

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Využití tunelových ostění pro získávání geotermální energie
Utilization of Tunnel Lining to the Geothermal Energy Extraction

Student:

Filip Lecián

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph. D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Lecián**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Využití tunelových ostění pro získávání geotermální energie**
Utilization of Tunnel Lining to the Geothermal Energy Extraction
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Princip geotermálních tepelných výměníků
3. Geotermální výměníky v tunelových ostěních, princip instalace
4. Příklady aplikací, zkušenosti
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Budkovský, J. *Geotermální výměníky – přidaná hodnota základových prvků*. [online] Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/tzb/geotermalni-vymeniky-pridana-hodnota-zakladovych-prvku_43890.html.
2. *Geothermal Tunnel Lining Segment Construction and Installation*. [online] Dostupné z : <https://www.rehau.com/download/786722/geothermal-tunnel-lining-sales-brochure.pdf>.
3. Brandl, H. Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques 2013*. Procedia Engineering 57, pp. 9–18.
4. Guozhu Zhang, Caichu Xia, Yong Yang, Meng Sun, Yichuan Zou. Experimental study on the thermal performance of tunnel lining ground heat exchangers. *Energy and Buildings*. Volume 77, 2014. pp. 149–157.
5. Buhmann, P. *Tunnel Geothermics –International experiences on regenerative energy concepts in tunnel projects*. [online] Dostupné z: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/16674/35_2015-06-02-VortragBarcelona-Buhmann-Rev02.pdf.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

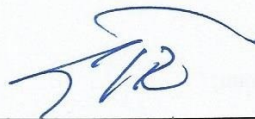
Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2017

Datum odevzdání: 04.05.2018



doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 4. 5. 2018

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 4. 5. 2018

.....
Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce doc. RNDr. Evě Hrubéšové, Ph.D. za vedení, konzultace a rady při zpracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za zázemí a přítelkyni za cennou pomoc.

Anotace

Využití základových prvků v kontaktu s horninovým prostředím, k získávání geotermální energie, je již dobře známo. V posledních letech bylo vyvinuto několik různých technologií pro odebírání, či ukládání tepla z horninového prostředí prostřednictvím tunelových ostění. Tato práce pojednává o základních principech nutných pro návrh geotermálního tepelného výměníku. Prezентuje výčet aplikací primárního okruhu tepelného výměníku do konstrukčních prvků tunelových ostění, jako jsou prefabrikované segmenty, stříkaný beton, kotevní systémy, podzemní a pilotové stěny. Součástí bakalářské práce je také seznámení s konstrukcemi čtyř tunelů, ve kterých byl s úspěchem zabudován potrubní systém, odebírající geotermální energii.

Klíčová slova:

Geotermální energie, tepelný výměník, tunelové ostění, teplosměnná kapalina, potrubní systém, teplená výměna

Annotation

The use of foundations elements which are in contact with ground, for collecting of the geothermal energy, is a well known method. Recently, several technologies for extraction or injection of heat from/into ground via tunnel lining were designed. This thesis describes the basic principles, which are necessary for geothermal heat exchanger design. It presents an overview of application primary circuit heat exchanger to the construction elements of tunnel lining, such as segmental lining, sprayed concrete, anchor system, diaphragm and pile walls. The thesis also includes the list of four tunnels construction, where the absorber pipe system was successfully installed.

Keywords:

Geothermal energy, heat exchanger, tunnel lining, heat carrier fluid, absorber pipe system, heat exchange

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	7
1 ÚVOD.....	8
2 PRINCIP GEOTERMÁLNÍCH TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ	9
2.1 Geotermální energie	9
2.2 Typy geotermálních tepelných výměníků	10
2.3 Podmínky pro návrh geotermálního tepelného výměníku	11
2.4 Tepelné vlastnosti podloží a podzemní vody	14
2.4.1 Thermal Response Test (TRT)	16
2.5 Dimenzování geotermálních tepelných výměníků.....	18
2.6 Princip tepelného čerpadla	19
2.6.1 Účinnost tepelných čerpadel	20
2.7 Energetické základy a jejich výhody.....	21
3 GEOTERMÁLNÍ VÝMĚNÍKY V TUNELOVÝCH OSTĚNÍCH, PRINCIP INSTALACE	25
3.1 Dělení tunelů podle způsobu odebírání geotermální energie	25
3.2 Technologie výstavby tunelů	27
3.3 Ostění ze stříkaného betonu	27
3.4 Ostění z prefabrikovaných segmentů	29
3.5 Pilotové stěny	32
3.6 Podzemní stěny	32
3.7 Energetické kotvení.....	33
4 PŘÍKLADY APLIKACÍ, ZKUŠENOSTI	35
4.1 Tunel Jenbach v Rakousku.....	35
4.2 Tunel Stuttgart-Fasanenhof v Německu.....	39
4.3 Vídeňské metro: Sekce U2	42
4.4 Tunel Lainzer ve Vídni	45
5 ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	49
SEZNAM OBRÁZKŮ	54
SEZNAM TABULEK.....	55

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

COP	topný faktor [-]
E_1	spotřeba elektrické energie pro chod tepelného čerpadla [kWh]
E_2	spotřeba elektrické energie pro záložní zdroje [kWh]
E_3	spotřeba elektrické energie pro pohon pomocných zdrojů [kWh]
L	délka sběrného potrubního systému [m]
OCR	stupeň překonsolidace [-]
P_{el}	spotřeba elektrické energie [W]
Q	teplo dodané soustavou pro vytápění či ohřev teplé vody [kWh]
Q_g	energetická spotřeba budovy [W]
Q_h	topná kapacita [W]
Q_o	chladicí kapacita teplosměnného média na vodu [W]
Q_{wp}	celkový energetický požadavek [W]
Q_{ww}	energie na ohřev teplé vody [W]
q_e	odběrová kapacita podloží [W/m]
R_b	tepelný odpor vrtu [W/(m ² K)]
R_c	koefficient přenosu tepla mezi teplosměnným médiem a potrubím [W/(m ² K)]
R_s	koefficient přenosu tepla sběrným potrubím [W/(m ² K)]
R_v	koefficient přenosu tepla materiálem energetického základu [W/(m ² K)]
SCOP	sezónní průměrný topný faktor [-]
SPF	sezónní topný faktor [-]
Z	časový interval [hod]
σ_v	překonsolidované napětí [kPa]
σ_p	aktuální stav napětí [kPa]

1 ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je využití tunelových ostění pro získávání geotermální energie. Využívání geotermální energie z mělkých vrstev pod zemským povrchem, prostřednictvím tepelných čerpadel má již dlouholetou tradici. Využití základových prvků pozemních staveb jako primárního okruhu geotermálního systému představuje velkou příležitost k čerpání tohoto druhu energie. Mezi systémy energetických pilot a podzemních stěn se v minulých letech přidala také aktivace tunelových ostění.

Tato práce je rešeršního charakteru a zaměřena je na teoretické znalosti pro okrajové podmínky, dimenzování a zabudování geotermálních tepelných výměníků do tunelů ražených i hloubených.

V úvodu práce budou objasněny náležitosti dimenzování geotermálních tepelných výměníků, a s tím související znalosti proudění tepla v podloží. Kapitola bude obsahovat také výčet typů tepelných výměníků pro chod tepelného čerpadla země-voda. V neposlední řadě bude věnována pozornost samotnému principu tepelného čerpadla a faktorům ovlivňujícím jeho účinnost.

Druhá část bakalářské práce se bude zabývat instalacemi primárního okruhu geotermálního tepelného výměníku, do různých druhů tunelových ostění.

Závěrečná kapitola bude obsahovat výčet několika konkrétních příkladů využívání tunelových ostění, pro získávání geotermální energie. Na jednotlivých tunelech bude popsána instalace potrubních okruhů, instrumentace pro získávání hodnot odběrových výkonů a interpretace naměřených dat.

2 PRINCIP GEOTERMÁLNÍCH TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ

2.1 Geotermální energie

Geotermální energie je, po energii solární, druhým nejčastěji se vyskytujícím tepelným zdrojem na Zemi. Je to, v přeneseném významu, přírodní teplo sálající ze Země. Obrovská množství energie se vytváří a ukládá v zemském jádře, plášti a kůře. [1]

Zemská kůra má pod kontinenty tloušťku od 15 do 50 km. Na její spodní straně dosahuje teplota až 1100 °C. Zemská kůra je, v porovnání s obvodem Země, který je asi 12750 km, jen tenká vrstva. Pod kůrou se nachází plášť, dosahující do hloubky asi 2900 km. Teplota v něm dosahuje až 3700 °C. Jádro, jehož poloměr činí asi 3430 km, se skládá z kapalné vnější části a pevné vnitřní části a teplota v něm pravděpodobně dosahuje teplot 4000–5000 °C. [2]

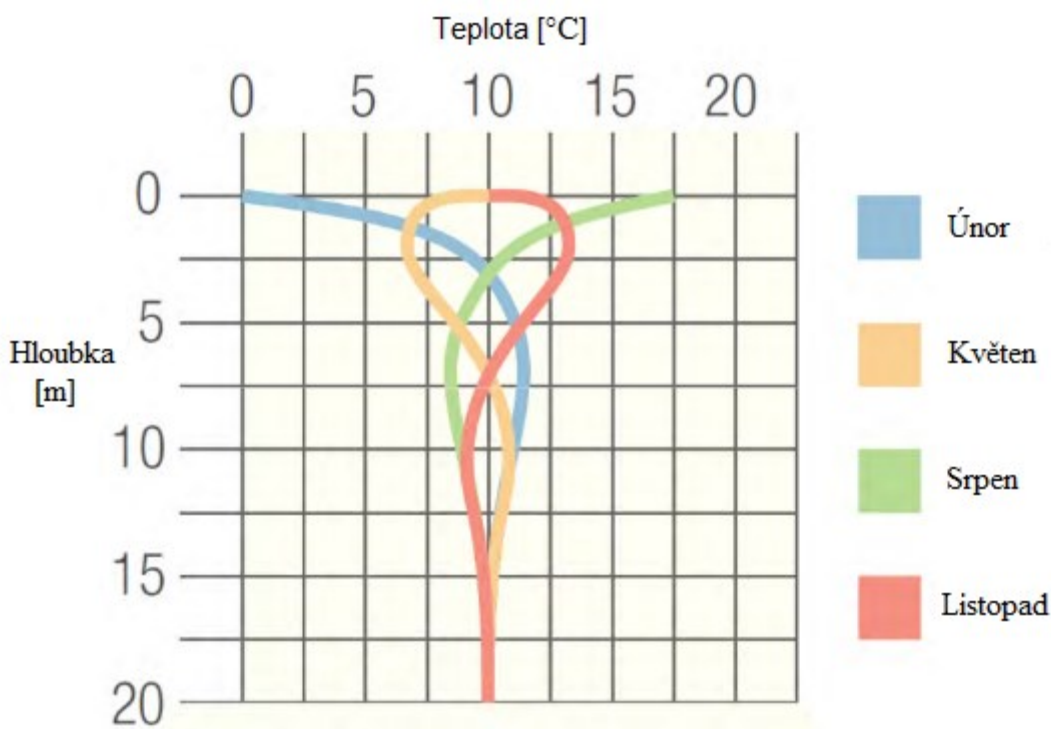
Teplo vstupá vzhůru směrem k zemskému povrchu prouděním, vedením nebo sáláním. Vedením se teplo přenáší odevzdáním části kinetické energie teplejších částic na chladnější částice. Pokud se mohou částice přemísťovat, dochází k proudění tepelné energie. Tento jev nastává například při tavení hornin na magma. To při přechodu do kapalného stavu změni svou hustotu a začne stoupat směrem k povrchu. Tepelný tok pod povrchem způsobuje nárůst teploty přibližně 25–30 °C/km. [4] Tato tepelná energie se pod zemí nachází zaprvé zřejmě ještě z dob jejího vzniku, kdy byla Země ještě planetou rozžhavených hornin a magmatu. Zadruhé z procesů přirozeného rozpadu radioaktivních izotopů v zemské kůře. [3]

Geotermální zdroje se mohou dělit na vysokoteplotní, ve vulkanicky aktivních územích, s teplotou nad 200 °C. Středně teplotní zdroje, mají teplotu v rozmezí 200–150 °C. Tyto zdroje se mohou použít pro přímou výrobu elektrické energie a pro vytápění. Nízkoteplotní zdroje mají teploty pod 150 °C, vyskytují se nejhojněji a jsou využitelné pro vytápění objektů. [4]

Průměrná teplota zemského povrchu se pohybuje přibližně okolo 13 °C. Je ovlivňována vyzařováním solární energie, tokem podzemní energie, generováním tepla lidskou činností, klimatickými podmínkami a různými a kombinacemi těchto vlivů. Teplota několik metrů pod zemí však zůstává po celý rok nedotčena vnějšími vlivy na hodnotě kolem

10 °C, v závislosti na klimatickém pásmu, viz obrázek 1. Od hloubky 50 m pak stoupá přibližně o 3 °C/100 m. [2]

Z tohoto důvodu je geotermální energie zdrojem, který celoročně umožňuje využívání tepla pro ohřívání nebo ochlazování. [2]



Obrázek 1: Graf závislosti teploty horninového prostředí na hloubce pod povrchem a ročním období. Upraveno z [24]

2.2 Typy geotermálních tepelných výměníků

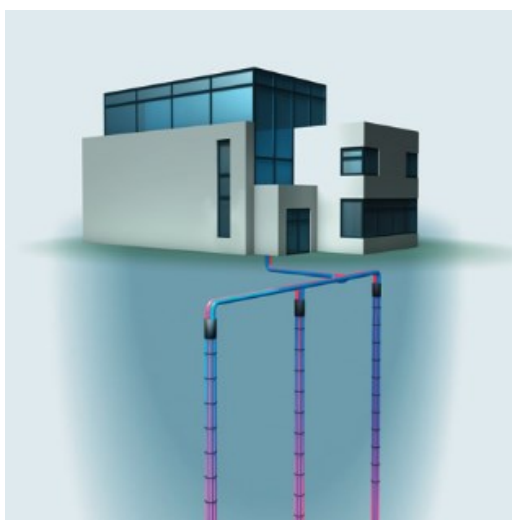
Geotermální tepelné výměníky využívají stálé geotermální energie pro tepelnou výměnu s cílovým objektem. [37]

Uzavřený systém se skládá ze soustavy trubek, v nichž koluje nemrznoucí teplosměnná směs. Tato směs zprostředkovává tepelný přenos. Potrubní systém může být zaveden do vrtu v podloží nebo ponořený do vody. Výměníky mohou být instalovány jak vertikálně, tak horizontálně, viz obrázky 2 a 3. [37]

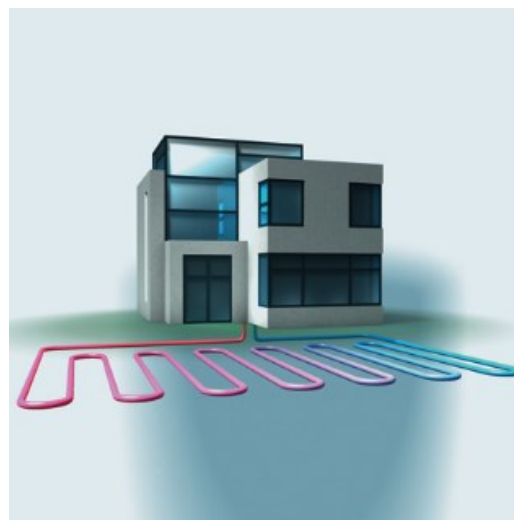
Horizontální kolektor se skládá ze soustavy trubek umístěných v nezamrzné hloubce, přibližně 1,2–1,5 m pod povrchem. Tepelný přenos zajišťují polyethylenové hadice naplněné nemrznoucí směsí, ve vzdálenostech 60–80 cm. Vertikální výměníky jsou tvořeny

polyethylenovými trubkami vloženými do vrtu. Vrt je vyplněn zálivkou z cementové nebo jílocementové směsi. Vrty o průměru obvykle 15–20 cm dosahují hloubek až 200 m. Z tepelného výměníku je médium vedeno sběrným potrubím do tepelného čerpadla. [2]

Při využívání otevřeného systému tepelných výměníků je teplosměnná kapalina přímo v kontaktu s tepelným zdrojem. Může jít o kapalinu pumpovanou do zavrtaných trubek nebo to může být podzemní voda, čerpaná ze zvodně a po jejím využití vháněna zpět. Tato voda je vedena do budovy k jednotce tepelného čerpadla a využívána pro potřeby budovy. [37]



Obrázek 3: Schéma uložení vertikálního, uzavřeného geotermálního tepelného výměníku. Převzato z [2]



Obrázek 2: Schéma horizontálně uloženého, uzavřeného geotermálního tepelného výměníku. Převzato z [2]

2.3 Podmínky pro návrh geotermálního tepelného výměníku

Základním předpokladem pro provoz geotermálního tepelného výměníku je, že horninové prostředí musí mít vyšší teplotu než vzduch v zimě nebo nižší teplotu než vzduch v létě. Tyto požadavky závisí na tom, zda je tepelný výměník využívám jako topný nebo chladicí systém. Systémy geotermálních výměníků mohou pracovat na pouze topném režimu nebo na systému, který kombinuje vytápění a chlazení. Celoroční režim, který kombinuje ukládání tepla do podloží v letním období a odebírá jej v zimním období je, z ekonomického hlediska, výhodnější. Celoroční cyklus ukládání a odebírání energie totiž zajišťuje tepelnou stabilitu podloží a teplota v okolí geotermálních výměníků může zůstat beze změn po celou dobu provozu. [6]

Pro správný návrh tepelného výměníku je nutná znalost inženýrskogeologických a hydrogeologických podmínek. Teplo odebírané tepelným okruhem je závislé na tepelných a hydraulických vlastnostech podloží. [4] Mezi podstatné hydraulické vlastnosti zvodnělých systémů můžeme zařadit koeficient filtrace, koeficient průtočnosti (transmisivity) a hydraulický spád, který spolu s existující otevřenou efektivní pórovitostí umožňuje proudění vody horninovým prostředím. [48] Mezi hlavní tepelné parametry hornin můžeme zařadit tepelnou vodivost hornin, neovlivněnou teplotu horninového prostředí a měrnou tepelnou kapacitu prostředí. [7]

Teplo z podzemní je nejsnáze odebíráno ze zvodnělého propustného prostředí. Silně zvodnělé štěrky a písky s velkým prouděním podzemní vody vykazují specifický odběrový výkon 55–85 W/m, při výkonu čerpadla 30 kW. Efektivita získávání tepla z podloží klesá ve vlhkých jílech a hlínách, kde se specifický odběrový výkon pohybuje mezi 30–40 W/m. Odběrový výkon je pak nejnižší v suchých píscích a štěrcích, zde se hodnota pohybuje pod 20 W/m. V suchých zeminách je zapotřebí vytvoření větší odběrové plochy tepelného výměníku. [6]

Přítomnost podzemní vody vždy zvyšuje účinnost tepelných výměníků určených pouze pro vytápění nebo pro klimatizaci. Pro tento typ využití je výhodný velký tok podzemní vody a velká permeabilita podloží. Proudění podzemní vody však může mít také negativní vliv, v případě, že podloží je využíváno k uskladnění tepelné energie v létě a jejímu opětovnému využití v zimě. Toto teplo je vlivem proudění vody odváděno z okolí tepelného výměníku. Proto se upřednostňuje prostředí s pomalou výměnou podzemní vody a malou permeabilitou podloží. [7]

Minimální hloubka založení tepelných výměníků, umístěných v základových prvcích jako jsou piloty, základové desky a podzemní stěny, je z ekonomického hlediska uváděna přibližně na 6 m. Jedná se o požadavek potřebný z důvodu rostoucího energetického potenciálu výměníku s hloubkou. Hloubka vrtů pro běžná tepelná čerpadla je, z důvodu menší plochy pro tepelnou výměnu, výrazně větší. [8]

Návrh a instalace geotermálních energetických systémů jsou ohraničeny některými technickými limity. Problémy, které mohou omezovat provoz jsou ztráty tepla nebo tlaku kvůli velké délce sběrného potrubí. Klíčová je také volba teplosměnného média. Nejčastěji je využívána nemrznoucí směs vody a glykolu. Avšak, tepelný okruh, ve kterém je jako teplosměnné médium navržena voda bez přítomnosti glykolu, má některé výhody:

- odpadá ekologické riziko při případném porušení potrubního systému,
- lepší tepelná vodivost ve srovnání směsi glykol-voda,
- nižší cena za teplosměnné médium při použití vody místo směsi vody s glykolem,
- omezení nákladů za provoz, viskozita vody je nižší a tepelná kapacita vyšší, to vede, k menší spotřebě elektrické energie tepelného čerpadla,
- teplota konstrukčních prvků by se neměla dostat pod 0 °C. [6]

Teplo, které může být odebráno nebo uloženo do horninového prostředí, závisí také na maximální hustotě tepelného toku v potrubním systému tepelného výměníku. Zde je tepelný přenos zajišťován vynuceným prouděním teplosměnného média. Mezi základní parametry, které je nutno brát v úvahu při návrhu geotermálního výměníku patří průměr a délka potrubí, tloušťka stěny trubky, typ proudění kapaliny (laminární nebo turbulentní), rychlost proudění, hustota, viskozita, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita teplosměnné kapaliny. [8]

Je-li potrubní okruh tepelného výměníku uložen v základových prvcích, určuje účinnost systému geometrie jednotlivých prvků. Charakteristické hodnoty odběrového tepla pro jednotlivé typy konstrukcí jsou:

- piloty, průměru 0,3–0,5 m; 40–60 W/m,
- piloty, průměru většího než 0,6 m; 35 W/m²,
- podzemní a pilotové stěny (z obou stran zakryté); 30 W/m²,
- základové desky, 10–30 W/m². [6]

Při střídání topných a chladících fází je potřeba také zvážit rizika spojená s teplotními změnami v základech a podloží. Během topné fáze dochází k odebírání tepla a smršťování konstrukčních prvků za vzniku přídavných tahových napětí. Změny teplot mohou také měnit mechanické vlastnosti zemin. Vysoké teploty mohou zhoršovat vlastnosti zemin vysycháním. V zimě naopak může docházet k promrzání. Náchylnost zemin na změnu teploty závisí na typu konkrétní zeminy, na stupni saturace a proudění podzemní vody. Problémové mohou být jíly, u kterých hrozí jak smršťování, tak bobtnání. [6]

2.4 Tepelné vlastnosti podloží a podzemní vody

Množství tepla, které je možno odebrat z podloží, je charakterizováno především hodnotou tepelné vodivosti hornin, která vyjadřuje, jak dobře je teplo vedeno horninou k vrtu primárního okruhu geotermálního výměníku. Hodnoty tepelné vodivosti vybraných hornin a materiálů jsou znázorněny v grafu 1. Je ovlivňována velkým množstvím faktorů. V geologicky pestrém prostředí se tyto vlastnosti mohou lišit na poměrně krátkých vzdálenostech. Ke správnému návrhu tepelného výměníku je nutná dobrá znalost inženýrskogeologických a hydrogeologických poměrů. Schopnost primárního okruhu odebírat teplo závisí na širokém spektru vlastností a stavu podloží, jako je míra zvětrání, vrstevnatost, ulehlost, vlhkost, pórovitost, hydraulický spád, výška hladiny podzemní vody atd. S tepelnou odezvou hornin přímo souvisí tepelné vlastnosti horniny a hydraulické vlastnosti podzemní vody. [9]

Zeminy se skládají z pevné fáze a pórů, vyplněných vodou, vzduchem nebo vodní párou. Zahřívání sypkých zemin v odvodněných podmínkách způsobuje objemový nárůst v závislosti na koeficientu teplotní rozpínivosti zrn zeminy. [9]

Materiál	Tepelná vodivost [W/(m.K)]	Měrná tepelná kapacita [kJ/(kg.K)]	Hustota [10 ³ kg/m ³]
Suchý jíl/hlína	0,4-1,0	1,5-1,6	1,8-2,0
Nasycený jíl/hlína	1,1-3,1	2,0-2,8	2,0-2,2
Suchý písek	0,3-0,9	1,3-1,6	1,8-2,2
Nasycený písek	2,0-3,0	2,2-2,8	1,8-2,3
Pískovec	1,9-4,6	1,8-2,6	2,2,2,7
Vápenec	2,0-3,9	2,1-2,4	2,4,2,7
Beton	0,9-2,0	~1,8	~2
Plast (HD-PE)	0,42	1,8	0,96
Voda	0,56	4,2	0,999

Tabulka 1: Orientační hodnoty tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a hustoty vybraných hornin a materiálů. Upraveno z [2]

Teplotní odezva jílovitých zemin je komplikovanější. Termomechanické chování jílovitých zemin závisí na jejich mikrostruktuře a elektrochemické rovnováze mezi jednotlivými zrny. Tak jako saturované sypké zeminy, i jílovité zeminy se během zahřívání

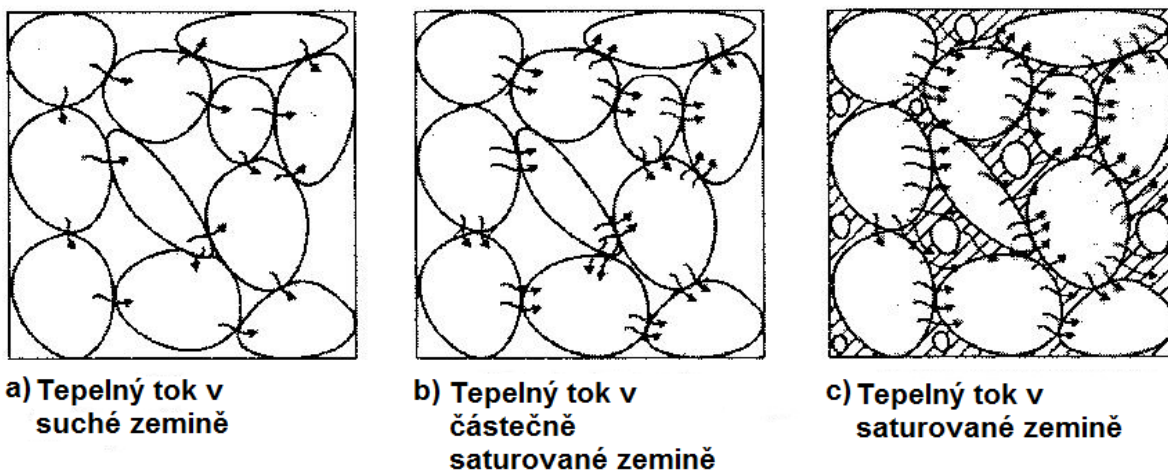
rozpínají. V odvodněných podmínkách však může být pozorováno jak smršťování, tak rozpínání, a to v závislosti na míře zatížení v minulosti. Tento stav je vyjádřen pomocí stupně překonsolidace (OCR). [9]

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_v} \quad (1)$$

Kde, σ_p je překonsolidované napětí a σ_v znázorňuje současný stav. Překonsolidované napětí je maximální svislé napětí, kterému bylo prostředí v minulosti vystaveno. Toto napětí zůstává v paměti zeminy a pokud je vystavena napětí menšímu, než je napětí z minulosti, jsou deformace malé a víceméně elastické. Zemina je považována za normálně konsolidovanou, pokud je OCR v rozmezí 1–2. Materiál je brán jako překonsolidovaný, pokud je OCR větší než 2. Jemnozrnné zeminy normálně konsolidované se během zahřívání stahují, a značná část této deformace je nevratná. Překonsolidované jemnozrnné zeminy procházejí rozpínáním během ohřívání, které je však redukováno smršťováním během ochlazování. Mezi těmito extrémními stavy se nachází zeminy slabě překonsolidované, v tomto stavu zemina prochází během ohřevu počátečním rozpínáním a následným smrštěním. Během ochlazování následuje smršťování. [9]

Zemina může projít nevratnou deformací, zapříčiněnou nárůstem teploty, za konstantního mechanického zatížení, které je rovno nebo trochu nižší, než je překonsolidované napětí. [9]

Jako trojfázový systém se zemina skládá z pevné (zrna zeminy), kapalné (voda) a plynné (vzduch). Pokud jsou póry zeminy vyplněny vodou namísto vzduchem, tepelná vodivost prostředí narůstá. Tepelný přenos v zeminách může být uskutečněn kondukcí (vedením), konvekcí (prouděním) nebo sáláním. Sálání tepla je v zeminách zanedbatelné. Zahrnuje většinou necelé 1 % celkového tepelného přenosu. Přenos tepla prouděním je značný za přítomnosti podzemní vody. Tepelné vlastnosti a jejich vztah k teplotě jsou odlišné pro jednotlivé fáze zeminy a záleží na procentuálním uspořádání trojfázového systému. Vztah mezi tepelnou vodivostí a obsahem vody je dán vztahem mezi spolupůsobením vody a pevné částice zeminy. Za velmi malého obsahu vody v zemině je vodní obal kolem zrna zeminy příliš tenký na to, aby zlepšoval tepelný kontakt mezi zrny zeminy. Při zvýšení saturace zeminy začnou vodní můstky mezi zrny narůstat, což má za následek výrazný nárůst tepelné vodivosti, viz obrázek 4. [9]



Obrázek 4: Tepelný tok v zemině suché, částečně saturované a saturované. Upraveno z [9]

2.4.1 Thermal Response Test (TRT)

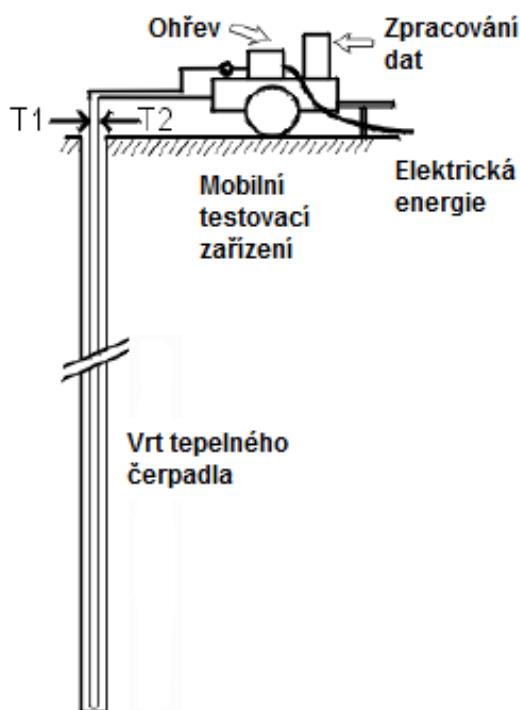
K zjišťování tepelných vlastností podloží na konkrétním místě se používá tzv. Thermal Response Test (test teplotní odezvy vrtu). Jedná se o polní zkoušku, kdy se po dobu několika dnů nechává vrtem cirkulovat ohřáté médium. Z vývoje teplot se přepočítává tepelná vodivost hornin, zohledňující také přínos existujícího přítoku podzemní vody. [10]

Úkolem TRT je na základě experimentálních měření zjišťovat tepelné vlastnosti hornin, v hloubkách, do kterých jsou navrženy vrty pro tepelná čerpadla. U malých projektů jsou tyto vlastnosti většinou zjišťovány laboratorně nebo tabulkově, na základě vzorků odebraných z dané lokality. Zjišťování tepelných charakteristik laboratorně má však své nevýhody. Takto měřené vlastnosti jsou zjišťovány pouze ze vzorků vyjmutých z prostředí, nezohledňujících některé úložné podmínky a proudění podzemní vody. Odebírání vzorků jádrovými vrty je také drahé. Laboratorními zkouškami není možné zjistit vliv vystrojení vrtu na tepelném přenosu ze stěny vrtu do plastového výměníku. Pro větší projekty by měla být tepelná odezva měřena přímo na staveništi. [11]

Nejdůležitějším parametrem zjišťovaným během TRT je tepelná vodivost prostředí. Tato vlastnost je specifická pro každý typ podloží a nedá se mechanicky ovlivňovat. Tepelný přenos mezi stěnou vrtu a teplosměnným médiem v trubkách je však kontrolován průměrem vrtu, rozměry a rozmístěním potrubí, materiálem potrubí a výplní ve vyvrtaném prstenci. Tyto položky jsou zahrnuty ve veličině tepelného odporu ve vrtu. Další veličinou zjištěnou pomocí TRT je neovlivněná teplota horniny. [12]

Vybavení pro systém TRT sestává ze samotného testovacího vrtu, injektážní směsi vrtu, potrubního systému, oběhových čerpadel, nastavitelného topného výkonu pro ohřívání nebo chlazení média a měřidla pro zaznamenávání teploty při vstupu a výstupu z vrtu, viz obrázek 5. Pro snadný transport do blízkosti vrtu bývá zařízení umístěno na přívěsu. [13]

Neovlivněná teplota horniny by měla být měřena před začátkem testu dříve, než začne čerpání ohřáté kapaliny do vrtu. Zařízení TRT se připojí k vrtu, který má stejné rozměry jako vrt plánovaný pro tepelné čerpadlo. Samotný pracovní proces začíná několik dní po vyvrtání vrtu, v okamžiku, kdy odezní teplotní změny způsobené vrtáním a injektáží zálivky. [13] Jakmile je systém TRT připojen, začne se do uzavřeného okruhu čerpat nemrznoucí směs. Běžně se jedná o glykol nebo vodu s lihem. Systém se utěsňuje tak, aby se v něm nevyskytovaly žádné vzduchové bubliny, které by mohly ovlivnit tepelnou výměnu mezi proudící kapalinou a horninovým prostředím. Poté se začne kapalina prostřednictvím ponorného ohřívače ohřívat, přičemž se měří teplota při vstupu a výstupu z okruhu, objemový průtok kapaliny nemrznoucího média a vložená elektrická energie ohřívače. Měření trvají obvykle 2–4 dny. [14]



Obrázek 5: Schéma aparatury pro TRT.
Upraveno z [12]

2.5 Dimenzování geotermálních tepelných výměníků

Dimenzování tepelných výměníků je spjato s vlastnostmi podloží, s rozměry základu, s uspořádáním potrubního systému, se zálivkou tepelného výměníku a s ročním operačním systémem tepelného čerpadla. Čím nižší je tepelný odpor vrtu, tím je větší tepelný přenos. Tepelný odpor vrtu vyjadřuje ztráty, při přechodu tepla z horninového prostředí do teplosměnného média. [2]

Odpory prostupu tepla z horninového prostředí do tepelného výměníku se vyskytují na rozhraní horninového prostředí, zálivky tepelného výměníku, potrubí a teplosměnného média. [2]

Tepelný odpor vrtu R_b , se skládá z dílčích sčítanců koeficientu přenosu tepla mezi teplosměnným médiem a potrubím R_c , koeficientu přenosu tepla sběrným potrubím R_s a koeficientu přenosu tepla materiálem energetického základu R_v .

$$R_b = R_c + R_s + R_v [W/(m^2K)] \quad (2)$$

Požadovaná délka sběrného potrubního systému L závisí na odběrové kapacitě podloží q_e a na chladicí kapacitě Q_o teplosměnného média na vodu. [2]

$$L = \frac{Q_o}{q_e} [m] \quad (3)$$

Chladicí kapacita Q_o poukazuje na rozdíl mezi topnou kapacitou Q_h a spotřebou elektrické energie P_{el} . [2]

$$Q_o = Q_h - P_{el} [W] \quad (4)$$

Při návrhu potrubního systému tepelného výměníku se musí předcházet ztrátám způsobeným nižším tlakem teplosměnného média. Nižší tlak v potrubí je způsoben v případě použití nemrznoucího média, jež má oproti vodě větší viskozitu. Maximální rychlost proudění média by měla být 1 m/s. Proudění média by mělo být turbulentní, tím je zajištěn lepší tepelný přenos z potrubí do média, za zvyšování teploty teplosměnné kapaliny. [2]

V případě navrhování monovalentního tepelného čerpadla, musí zdroje tepla vyhovět požadavkům vytápěné budovy Q_g , ne výkonu tepelného čerpadla. Celkový energetický požadavek Q_{wp} zahrnuje potřebu budovy Q_g a energii na ohřev teplé vody Q_{ww} , v určitém časovém intervalu Z . [2]

$$Q_{wp} = (Q_g + Q_{ww}) * Z [W] \quad (5)$$

Pokud je navržena varianta s nižší, než požadovanou topnou kapacitou a kratším tepelným okruhem, zvýší se provozní doba tepelného čerpadla. To má za následek přetěžování tepelného čerpadla. Ke snížení nárůstu provozních hodin musí být prodloužena délka potrubního okruhu, což však způsobí větší spotřebu provozní energie. [2]

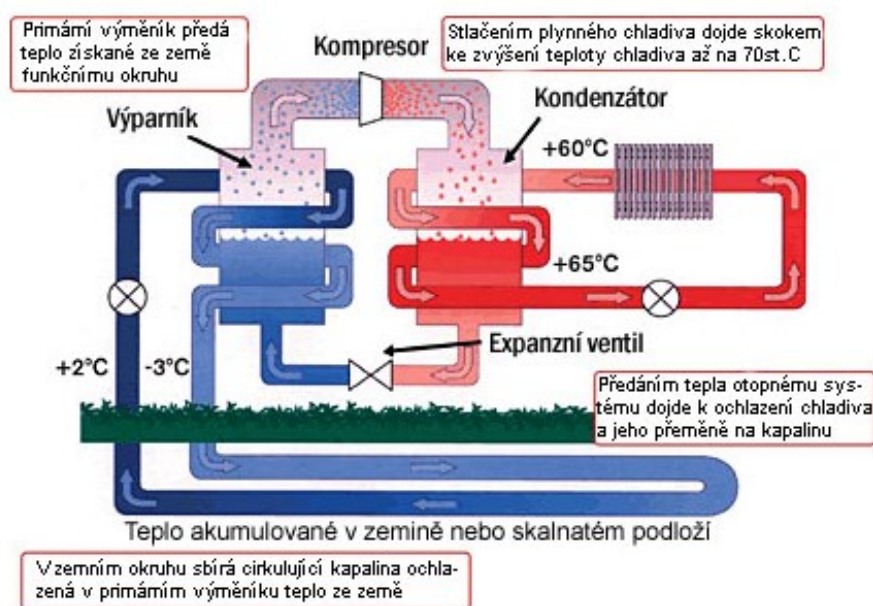
2.6 Princip tepelného čerpadla

Geotermální tepelné výměníky pracují na uzavřeném principu tepelného čerpadla země-voda. Tepelná čerpadla jsou uzpůsobena na získávání nízkopotencionálního tepla k vytápění či ochlazování. Tuto energii obsahuje horninové prostředí, jehož nízká teplota se nedá použít k přímému využití. Díky dodané elektrické energii, nutné pro pohon kompresoru, může být teplo přečerpáváno na požadovanou výšku. [4] Tepelná čerpadla se skládají z uzavřeného tepelného okruhu a čtyřech základních částí: výparníku, kompresoru, kondenzátoru a expanzní trysky. Celý princip tepelného čerpadla je založen na obráceném Carnotově principu. [15]

Carnotův cyklus je jeden z nejdůležitějších kruhových dějů, tedy děj, u kterého je počáteční a konečný stav totožný. Skládá se ze dvou izotermických a dvou adiabatických dějů. Práce, kterou je plyn v uzavřené nádobě schopen vykonat, má svou omezenou hranici. Plyn totiž není schopen stále zvětšovat svůj objem. Tepelný stroj může trvale pracovat jen v tom případě, že se plyn po ukončení expanze vrátí do původního stavu. [16]

V primárním okruhu je teplo akumulované v zemině nebo skalním podloží odebíráno soustavou trubek napuštěných nemrznoucí směsí. Tato ohřátá kapalina je pomocí vodního čerpadla vedena z primárního výměníku do výparníku. Zde je tekuté chladicí médium s velmi nízkým bodem varu ohřáto teplotou získanou ze zeminy a dovedeno ke změně skupenství na páru. Takto ohřáté chladivo je vedeno do kompresoru, kde je stlačeno, v důsledku komprese dojde k výraznému zvýšení teploty chladiva. [15]

Z kompresoru putuje ohřáté chladivo do kondenzátoru v sekundárním okruhu, kterým protéká topná voda. Zde chladivo v plynném stavu předá teplo otopné vodě. Pomocí teplovodních rozvodů je pak ohřátá voda rozvedena do vytápěného objektu. Tepelnou výměnou dojde k snížení teploty chladiva a k opětovné změně skupenství na kapalinu. Ochladená kapalina je hnána do expanzní trysky. V důsledku expanze dojde ke snížení jejího tlaku a tepelné energie. Kapalina opětovně putuje do primárního okruhu a celý proces se opakuje, viz obrázek 6. [15]



Obrázek 6: Schéma tepelného čerpadla. Převzato z [15]

2.6.1 Účinnost tepelných čerpadel

Při hodnocení účinnosti tepelných čerpadel se dá postupovat dvěma způsoby. Tepelná čerpadla mohou být posuzována normově, bez ohledu na typ budovy a geologické podmínky, do kterých budou nasazena. Topný faktor COP (coefficient of performance) vyjadřuje účinnost tepelného čerpadla. Udává poměr mezi vyrobeným teplem a spotřebovanou elektrickou energií. Čím je tedy hodnota topného faktoru vyšší, tím levnější je samotný provoz tepelného čerpadla. Tato hodnota je však uvažována pro normové laboratorní podmínky, jedná se tedy o teoretický topný faktor. [17]

$$COP = \frac{\text{výkon tepelného čerpadla}}{\text{příkon tepelného čerpadla}} \quad (6)$$

Hodnota $COP = 4$ znamená, že při dodání jednoho dílu energie získáme čtyři díly výkonu. Bezplatně tedy získáme tři díly energie. Účinnost tepelného čerpadla je silně ovlivněna rozdílem, mezi získanou a skutečně využitou tepelnou energií. Vysoká požadovaná teplota v sekundárním okruhu tepelného výměníku, při nízké hodnotě získané teploty v okruhu primárním, důsledkem nedostatečně ochlazené teplonosné kapaliny vracející se ze sekundárního okruhu, snižuje účinnost. Z ekonomických důvodů se doporučuje hodnota $COP \geq 4$. Z toho důvodu, by užitná teplota v sekundárním okruhu

neměla překročit 35–45 °C. Hodnota kapaliny v primárním okruhu by neměla překročit 0–5 °C. Splněním těchto podmínek je dosažen nejvýhodnější chod tepelného čerpadla. [17]

Sezónní průměrný topný faktor SCOP (seasonal coefficient of performance) lépe vyjadřuje průměrnou hodnotu za celou topnou sezonu. Tento koeficient zahrnuje data z testování tepelného čerpadla v laboratoři, za standardizovaných provozních podmínek (definovaná doba provozu, tepelná ztráta budovy, otopná soustava, klimatické podmínky). [18]

Vypovídající hodnotou je monitorování tepelných čerpadel v konkrétních provozních podmínkách. Sezónní topný faktor SPF (seasonal performance factor) vyjadřuje rovněž poměr mezi užitnou energií získanou čerpadlem a vloženou energií potřebnou k jejímu získání. SPF však v porovnání s COP zahrnuje celou soustavu s tepelným dodávajícím teplem v konkrétní budově (např. oběhová čerpadla, elektrokotel) a počítá se z celoročního chodu tepelného čerpadla. V současnosti se se standardními tepelnými čerpadly dosahuje hodnoty $SPF = 3,8–4,3$. Sezónní topný faktor se stanovuje jako hodnocení za daný časový úsek jako:

$$SPF = \frac{Q}{E_1 + E_2 + E_3} \quad (7)$$

Hodnota Q vyjadřuje teplo dodané soustavou pro vytápění či ohřev teplé vody. E_1 uvádí spotřebu elektrické energie pro chod tepelného čerpadla. Parametr E_2 je potřeba energie pro záložní zdroje, jako např. elektrokotle. E_3 zahrnuje energii pro pohon pomocných zdrojů, jako oběhového čerpadla. [18]

2.7 Energetické základy a jejich výhody

Geotermální energie v podzemí může být využívána pro ohřívání, či ochlazování celé řady obytných budov či dopravních staveb. Získávána je přizpůsobením základových prvků různých konstrukcí, jako například:

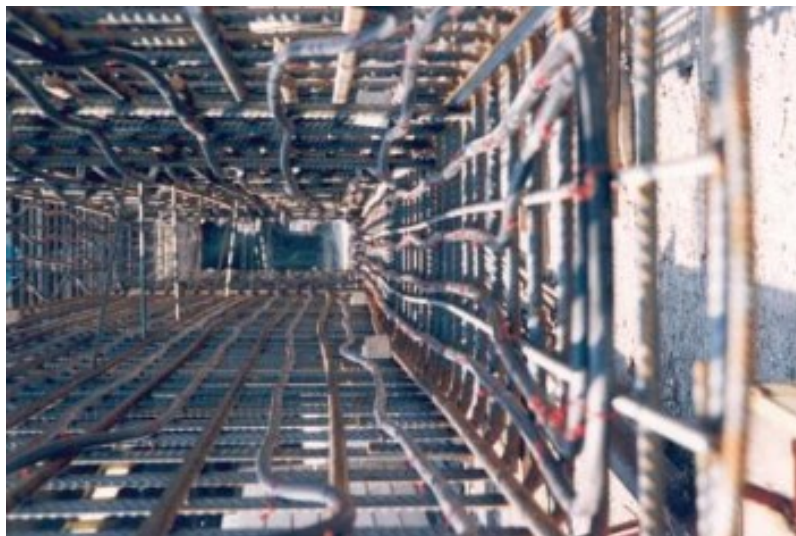
- pilot,
- podzemních stěn,
- základových desek,
- tunelových ostění,
- kotvicích systémů. [17]

Základové konstrukce jsou využívány k odebrání geotermální energie od začátku 80. let, kdy byly pro tyto účely poprvé použity základové desky, od roku 1984 také piloty, viz obrázek 7, a podzemní stěny, viz obrázek 8, od roku 1996. Tepelně aktivované základy těží z dobrých tepelných vlastností betonu, který zajišťuje větší efektivitu tepelného přenosu, než je tomu u klasických vrtů tepelných čerpadel. [19]

Primární okruh geotermálních tepelných výměníků se skládá z polyethylenových trubek či hadic, uložených v betonových konstrukčních prvcích, které jsou umístěny v kontaktu s horninovým prostředím. [19] Při instalaci energetických základů je důležité rozmístění výztužné ocelové konstrukce a potrubního systému. Nejmenší průměr energetického základu by měl zpravidla být 0,6 m. Toto opatření je z důvodu, že výztužná klec zabírá přibližně 75 % průměru základu a menší průměry by způsobovaly komplikace v osazení potrubního systému. Přívodní a odtokové potrubí by mělo být instalováno na opačných stranách základu, kvůli zamezení tepelného přenosu mezi jednotlivými částmi potrubí. Tento jev může snížit kvalitu tepelného odběru a způsobit rozdílný průběh teplot v základu. [20]



Obrázek 7: Uložení potrubního systému tepelného výměníku na armaturu piloty. Převzato z [8]



Obrázek 8: Uložení potrubního systému tepelného výměníku na armaturu podzemní stěny. Převzato z [35]

Během instalace by měl být potrubní systém naplněn vodou a natlakován. Toto opatření pomáhá odhalit netěsnosti v okruhu před instalací. Potrubní systém naplněný vodou také napomáhá rychlejšímu rozptýlení tepla produkovaného během hydratace betonu, čímž omezuje riziko popraskání konstrukce. [20]

Tepelná vodivost betonu narůstá s větším podílem pevných částic, na úkor vody. Přísady, jako popílek nebo vysokopecní struska mohou také zlepšit tepelnou vodivost. Větší podíl hrubozrnných částic zlepši tepelnou vodivost betonu, má však také za následek horší zpracovatelnost. Ta se projeví při betonování základu, kdy může směs špatně vyplňovat prostory a obalovat výztužnou konstrukci a potrubní systém. [20]

Potrubní systémy jsou spojovány sběrnými trubkami, navazujícími na tepelné čerpadlo a sekundární okruh. Sekundární okruh tvoří hadice nebo trubky v podlahách a stěnách budov, popřípadě v pódiích, tribunách, ve vozovkách nebo mostních deskách. [17]

Potrubí je v současné době tvořeno nejčastěji ze síťovaného polyethylenu (Pe-Xa) a tvořeno třemi vrstvami. Vnitřní vrstva je z polyethylenu o vysoké hustotě, prostřední vrstva z polymerního materiálu a vnější vrstva z ethylen-vinyl-alkoholu, která zabraňuje propouštění kyslíku. Trubky jsou schopny odolat vysokému tlaku a teplotám. Teplosměnná kapalina proudící potrubím tvořena směsí vody s propylen-glykolem a je využitelná až k teplotám okolo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. V předběžném návrhu musí být vzata do úvahy teplota teplosměnného média, v porovnání s neovlivněnou teplotou podloží. To ovlivňuje

požadovaný průtok, a tudíž návrh všech součástí potřebných pro tepelnou výměnu. Velký rozdíl teplot mezi podložím a teplosměnným médiem umožňuje lacinější geotermální mechanizaci, zároveň však výrazně ovlivňuje tepelný stav horniny a zvyšuje nároky na tepelné čerpadlo. Malý rozdíl mezi teplotou horniny a teplosměnného média má příznivější vliv na výkon tepelného čerpadla, vyžaduje však rozměrnější systém geotermálního výměníku. Optimální stav se vyskytuje v případě, kdy je rozdíl mezi teplotou kapaliny při výstupu ze systému a teplotou horniny, při chladicím režimu 11–17 °C a při topném režimu 6–11 °C. [21]

Výhody geotermálních výměníků mohou být shrnuty takto:

- Ekologicky příznivé vůči životnímu prostředí.
- Snižují spotřebu fosilních paliv, včetně exhalace oxidu uhličitého při spalování.
- V dlouhodobém měřítku ekonomicky výhodné.
- Jednoduchá instalace a dlouhodobá životnost.
- Systémy geotermálních tepelných výměníků jsou plně automatizovány.
- Uzavřený okruh umístěný v betonu znemožňuje poničení potrubí a znečištění podzemí.
- Geotermální systém může být snadno kombinován s jinými druhy energií.
- Snížení importu energií ze zahraničí, méně náchylná k ekonomické a politické situaci světa.
- Cena geotermální energie je stálá a nepodléhá cenovým výkyvům.
- Geotermální energie je nenáchylná na přírodní změny, jako je např. elektrická energie z hydroelektráren náchylná na výraznější sucha.
- Geotermální ochlazování může nahradit klasickou klimatizaci, která bývá považována za hlučnou a nezdravou. [20]

3 GEOTERMÁLNÍ VÝMĚNÍKY V TUNELOVÝCH OSTĚNÍCH, PRINCIP INSTALACE

Instalace tepelných výměníků vytvoří z tunelového ostění konstrukci získávající teplo jak z okolního horninového prostředí, tak i ze vzduchu tunelu. Vliv vzduchu na energetickém výstupu může činit až mezi 20–30 %. Energetické ostění také pomáhá regulovat teploty uvnitř tunelu a snižovat tak náklady na ventilaci či vytápění. Tunely se od základových konstrukcí budov liší značně větší možnou plochou využitelnou pro tepelnou výměnu. Systém tepelných výměníků instalovaných do tunelových ostění vyžaduje výrazně nižší náklady než klasické vrtané výměníky tepelných čerpadel. Kvůli náročnosti vrtů, které dosahují hloubek 50–200 m a potřebě prostoru pro instalaci vrtů tepelných čerpadel v terénu, je využití energetického zakládání ekonomicky i technicky výhodné. Pro tunely existuje řada řešení pro zapracování geotermálního výměníku do konstrukce. Mezi systémy energetických pilotových stěn se také používá podzemních stěn a energetického kotvení. Pro umístění tepelných výměníků přímo do tunelových ostění existují dvě hlavní metody:

- uchycení potrubního systému tepelného výměníku na geotextilie nebo přímo na povrch betonu mezi primární a sekundární ostění,
- zabudování potrubního systému do prefabrikovaných segmentů tunelového ostění. [22]

Tunelová ostění mohou být, jako ostatní energetické základy, využity dvěma způsoby. První způsob spočívá v čerpání energie z horninového prostředí nebo ukládání energie do něj, což má za následek trvalé ohřívání nebo ochlazování prostředí. Druhým způsobem je střídavé celoroční využití pro ohřev a klimatizaci. Horninové prostředí je potom využíváno jako zásobárna energie. Střídavý systém vede k rovnovážnému stavu teploty po celý rok. [22]

3.1 Dělení tunelů podle způsobu odebírání geotermální energie

Existují dva možné způsoby získávání geotermální energie z tunelových ostění. Otevřený systém je založen na přímém využití podzemní vody odváděné drenážním systémem. Teplota vody vytékající z drenážního systému tunelu je závislá na hloubce,

ve které je tunel ražen, na tepelných vlastnostech horninového prostředí a teplotě vzduchu v tunelu. Voda může dosahovat teploty až 50 °C. V portálech některých tunelů musí být voda vycházející z tunelů ochlazována, před jejím vypouštěním do venkovního prostředí. [23]

Tento systém je využíván ve švýcarských tunelech od 80. let 20. století. Voda odváděná z drenáží je přes tepelné čerpadlo dopravována do otopných systémů sousedních staveb. První tunel využívající vodu odváděnou drenážním systémem byl tunel St. Gothard, kde byl přirozený přítok podzemní vody 7200 l/min, o teplotě 15 °C. Tato voda je využita tepelným čerpadlem a odvedena zpět při teplotách mezi 3–6 °C. Jedná se o nejlevnější a vysoce efektivní systém využití tepelné energie z podloží, avšak vykazují vysoké nároky na nezávadnost vody vracející se ze systému tepelného výměníku zpět do zvodně. [37]

Při využití uzavřeného systému je geotermální energie získávána pomocí tepelných výměníků, umístěných v konstrukčních prvcích. Tepelné výměníky zpravidla sestávají z hadic vyrobených z polyethylenu. Ke zvýšení získané teploty je zapotřebí tepelné čerpadlo. [23]

Podle teploty uvnitř tunelu, a s tím souvisejícím způsobem odebrání tepla, se tunely dělí na chladné a teplé. V chladných tunelech je vnitřní teplota nízká, většinou shodná s vnější teplotou okolí. Teplota většinou po celý rok nepřekročí hodnotu 15 °C. Vnitřní průměr těchto tunelů je zpravidla velký, mezi 10–12 m. Převládající teploty v tunelu mají jen velmi omezený vliv na teplotu okolního horninového prostředí. [26] Vzduch v tunelu se nedá využít pro potřeby tepelné výměny, tepelná energie je získávána především z horninového prostředí. Chladné tunely se využívají jak pro vytápění, tak pro klimatizaci budov. Mezi tyto tunely patří krátké železniční a silniční tunely, tunely umístěné ve studených oblastech nebo tunely dobře přirozeně ventilované. [25]

V teplých tunelech je teplota vzduchu vyšší, než je teplota horninového prostředí. V letních měsících dosahuje hodnot až 30 °C a v zimním období hodnot kolem 20 °C. Teplo se získává především ze samotného tunelu. Získaná tepelná energie se využívá pro vytápění budov, což napomáhá ochlazování vzduchu v tunelu. Pro ochlazování budov se tyto tunely nevyplátí. Náklady na klimatizační systémy, které se navrhuji pro teplé tunely, mohou být částečně kompenzovány geotermálním výměníkem. Mezi teplé tunely se řadí dlouhé nebo hluboce uložené železniční a silniční tunely, kolektory nebo podzemní dráhy

ve městech, s typickým vnitřním průměrem kolem 7 m. Četné zastávky a velká frekvence proudění dopravy napomáhají k nárůstu teploty v tunelu. [26]

3.2 Technologie výstavby tunelů

Ražené tunely jsou takové, u kterých se celý průběh stavby odehrává v podloží, bez úmyslného zasahování stavebními pracemi na povrch. Typicky se využívá pro tunely uložené ve velkých hloubkách, kdy je výška nadloží větší než šířka výrubu nebo v zastavěných oblastech, znemožňujících konstruování otevřené stavební jámy. Výstavba probíhá konvenčním ražením nebo za použití tunelovacího stroje. [27]

Klasickou tunelovací metodu představuje Nová rakouská tunelovací metoda. Jedná se o observační metodu, využívající nosnou schopnost horninového masivu. Skládá se z etap budování primárního a sekundárního ostění. Mezi prvky primárního ostění se řadí stříkaný beton, aplikovaný na ocelové sítě, kotvy, svorníky, hřebíky a ocelové oblouky. Sekundární výztuž může poté zahrnovat stříkaný nebo monolitický beton, či prefabrikované dílce. [28]

Tunelovací stroje (TM) se dělí na razící stroje (TBM) a štíty (SM). Jedná se o mechanismy na kontinuální pobírání čelby. TBM se využívají v pevných skalních horninách, kdy se v případě nutnosti využívá stříkaného betonu a svorníků k zajištění výrubu. Štíty se nasazují v zeminách a v prostředích, vyžadujících krytí razícího mechanismu. Výrub je zajišťován prefabrikovanými železobetonovými či drátkobetonovými segmenty, skládanými do prstence. [29]

U hloubených tunelů se stavba provádí z povrchu v otevřené jámě, která je následně zasypána. Takto zhotovené tunely se většinou nachází těsně pod povrchem, mají jen velmi malé nadloží nebo v oblastech, které umožňují konstrukci stavební jámy. Hloubení tunelu může probíhat v pažené jámě, svahované jámě, metodou konstrukčních podzemních stěn, pilotových stěn nebo metodou ražby pod zastropením, která kombinuje hloubení s ražením (tzv. metoda „želva“). [30]

3.3 Ostění ze stříkaného betonu

V případě použití klasické tunelovací metody, např. Nové rakouské tunelovací metody, může být systém tepelného výměníku přikotven na primární ostění nebo uchycen na geotextílii, která je poté umístěna mezi primární a sekundární ostění, viz obrázek 9. Toto

byla také první technologie využití tunelového ostění pro tepelnou aktivaci tunelového ostění ze stříkaného betonu. [21]

V případě, kdy se instalace potrubního systému do stropu tunelu jeví jako obtížná, či nevýhodná z důvodu časových indispozic, může být potrubní systém uložen do protiklenby tunelu, viz obrázek 10. Tato metoda vyžaduje méně kotvicích bodů a její provedení je rychlejší. Hlavní nevýhoda spočívá v tom, že se sekce, ve které je uložen potrubní systém stává neprůjezdnou do doby, než je aplikováno sekundární ostění. [37]



Obrázek 9: Uložení potrubního systému geotermálního tepelného výměníku na geotextilii mezi primární a sekundární ostění. Převzato z [22]

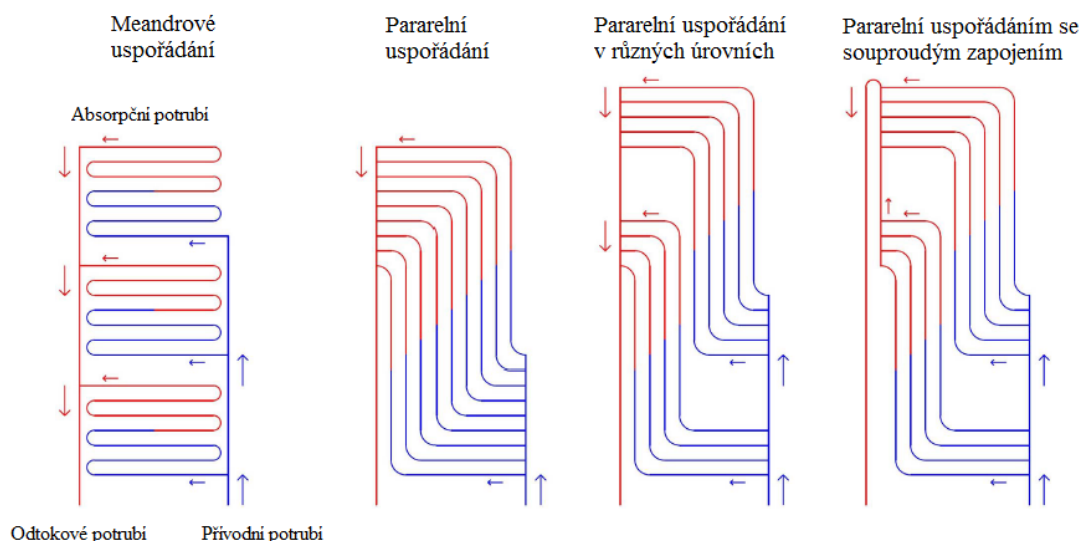


Obrázek 10: Uložení potrubního systému geotermálního tepelného výměníku do protiklenby tunelu. Převzato z [5]

Rozložení potrubního systému mezi primárním a sekundárním ostěním je navrhováno tak, aby pokrylo co největší plochu pro tepelný odběr a zároveň zajistilo co nejnižší tlakové ztráty a náklady. Instalace se provádí dvěma způsoby, viz obrázek 10:

- Meandrovité či spirálovité uspořádání, zajišťuje teoreticky největší rozdíl mezi teplotami přívodní a odtokové části systému. Sběrné potrubí, umístěné na obou stranách potrubního systému, zprostředkovává kontakt mezi aktivovanou tunelovou sekcí a tepelným čerpadlem. Toto uspořádání je vhodné v situacích, kdy je průběh teplot v horninovém prostředí v okolí tunelového ostění konstantní. V případě proměnlivého vývoje teplot v horninovém prostředí, mohou teplotní výkyvy způsobit tepelné ztráty v trase potrubního systému, což může vést ke snížení tepelného odběru.
- Potrubí uspořádané paralelně podél tunelu odebírá tepelnou energii z menší části tunelu, objemový průtok kapaliny je však o něco vyšší než u spirálovitého uspořádání potrubního systému. Sběrné potrubí je umístěno na obou výstupech

systemu. Tepelné ztráty jsou limitovány díky malé délce okruhu. Omezení tohoto uspořádání souvisí s tím, zda je reálně možné, aby každé potrubí vycházelo z přívodního potrubí a ústilo na stejném místě v odtokovém potrubí. Při nedostatku prostoru kolem přívodního potrubí může být systém rozdělen na menší skupiny. Tato okolnost nevyhnutelně omezí tepelný odběr. Tlakové ztráty, vyskytující se v systému, mohou být vyrovnávány souproutým zapojením potrubí. [22]



Obrázek 11: Schéma uložení potrubního systému geotermálního tepelného výměníku na primární betonové ostění nebo geotextilii. Upraveno z [22]

3.4 Ostění z prefabrikovaných segmentů

Potrubní systém tepelného výměníku je umístěn do výztužné klece segmentu už při výrobě. Stejně segmenty se vyrábí také pro klasické ostění bez přidané hodnoty tepelných výměníků, jejich využití může tedy být výhodně zahrnuto do standardní výroby. [32]

Vnější průměr trubek bývá 20–30 mm a klasická rozteč mezi trubkami 25–30 cm. Do každého segmentu je umístěno 20–30 m spirálovitě uložených trubek. Smyčky trubek jsou připevněny (např. plastovými objímkami) ke vnitřní straně vnější výztužné konstrukce segmentu tak, aby nedošlo k ovlivnění betonové vrstvy překrytí, viz obrázek 12. V případě výroby segmentů z drátkobetonu je potrubí uchyceno na speciálně vložené výztužné mříže. [32]

Spojování trubek se sousedními dílci je provedeno v tzv. prefabrikované kapse, viz obrázek 13. Při betonáži segmentů ve výrobě se do bednění na vnitřní straně

podélných spojů dílců vkládá přídavná forma. Ta vytvoří kapsu, pro napojení potrubních systémů sousedních segmentů. Kapsy jsou přibližně 200 mm dlouhé, 100 mm široké a 70 mm hluboké. Tato metoda nezasahuje do vnější drážky spojů, určené k utěsnění dílců. Rozměr spojovacích kapes je vyráběn co nejmenší, aby nedocházelo ke znatelné změně styčné plochy podélných spojů segmentů.



Obrázek 12: Spojovací kapsa prefabrikovaného segmentu.
Převzato z [26]



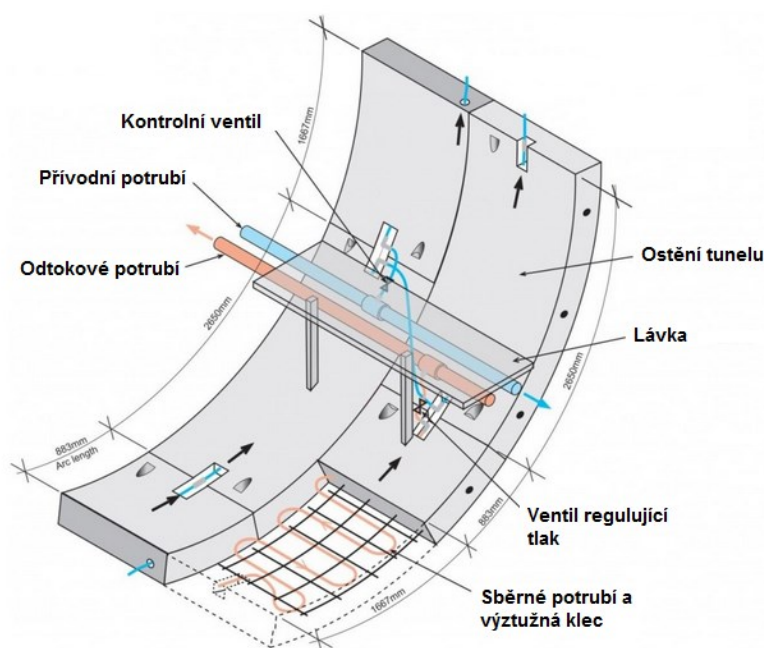
Obrázek 13: Uchycení potrubního systému tepelného výměníku na výztužnou klec prefabrikovaného segmentu.
Převzato z [45]

Trubky ve spojovací kapse jsou jednoduše ustřiženy na požadovanou délku a je do nich vsunut speciální spojovací dílec. Jedná se o voděodolný, vysokému tlaku odolávající spoj, který je rychle naistalován pomocí mechanicky ovládaného nástroje. Spojovací kapsy jednotlivých dílců musí být vyráběny s velkou přesností. Konce potrubí jsou v nich relativně úzké, takže musí ležet co nejpřesněji naproti sobě. Spoje jsou dostatečně poddajné a flexibilní, kvůli jisté instalační toleranci dílců, a také, aby bez poškození přenesly možné

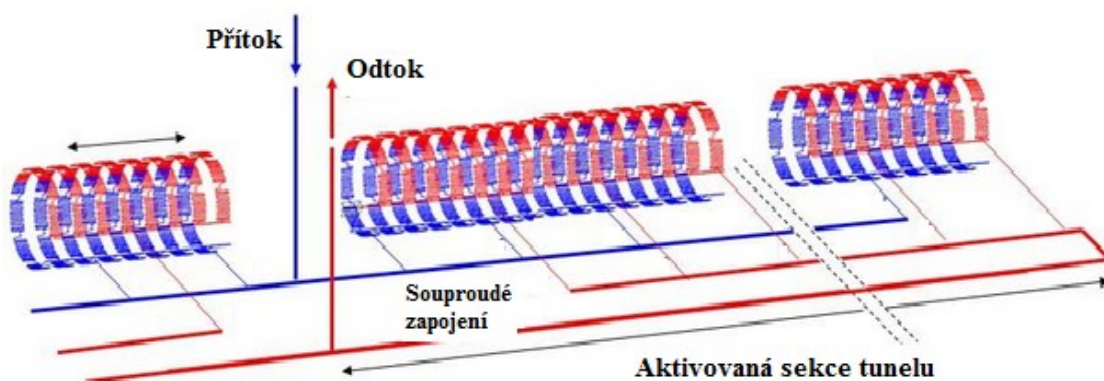
deformace prstence způsobené vnějším zatížením. Spoje trubek jsou provedeny po instalování segmentů do prstence. [32]

Po instalaci prstence je potrubí tepelného výměníku spojeno do jedné nepřetržité potrubní smyčky. Každá smyčka je připojena na přívodní a zpětné sběrné potrubí, viz obrázek 14. Sběrná potrubí mohou být instalována pod vozovkou, v kabelovodu na stěně tunelu, nebo na nouzovém chodníku. Prstenec se skládá z 6–7 segmentů. Dva nebo více prstenců mohou být hydraulicky propojeny a tvořit rozvětvený okruh. [33]

Každý okruh je připojen na sběrné přívodní a odtokové potrubí. Vybaveny jsou také kontrolními ventily, které mají za úkol izolovat jednotlivé okruhy v případě lokálních poruch a také napomáhají odvětrávání. Sběrné potrubí může být zapojeno souproudým způsobem, využívaným k vyrovnání tlakových ztrát mezi všemi potrubními okruhy, viz obrázek 15. [45] Ke ztrátám v podobě poklesu tlaku tekutiny, dochází v rovných úsecích důsledkem vzájemného tření částic tekutiny a vlivem tření mezi tekutinou a stěnami potrubí. V místech zúžení, kolen, spojů a ventilů dochází k deformaci proudu tekutiny a tím k poklesu tlaku. [46] Sběrné potrubí vede teplosměnnou kapalinu do míst napojení tunelu s povrchem, rozmístěných v určitých vzdálenostech od sebe. Při příliš velkém rozpětí spojovacích bodů se snižuje schopnost kontrolovat ztráty v potrubním systému. Spojení sběrného potrubí s povrchem může být zprostředkováno šachtami, průchody zastávek nebo propojovacími vrty. [33]



Obrázek 14 : Napojení přívodního a odtokového potrubí na potrubní systém v prefabrikovaném segmentu. Převzato z [45]



Obrázek 15: Schéma okruhů tepelně propojených segmentových prstenců a přítokového a odtokového potrubí s možností zpětného toku. Převzato z [45]

3.5 Pilotové stěny

Pilota se skládá z ocelové armatury zalité betonem. Potrubní systém s teplosměnným médiem se připevňuje na armaturu piloty, před jejím zabetonováním. Prefabrikované železobetonové piloty se vybavují geotermálním výměníkem v předstihu. Potrubní systém je připevněn na vnitřní stranu výztužné armatury, z důvodu jeho ochrany při manipulaci a betonáži. Konec potrubí je vyveden z piloty tak, aby po instalaci vyčníval a byl přístupný pro další manipulaci. [2]

Potrubí v pilotě může být uloženo několika způsoby. Meandrovitě, ve spirále, nebo ve tvaru písmena U. V hlavě piloty se nachází připojení na přítokové a odtokové potrubí tepelného výměníku, které může být propojeno s ostatními pilotami. [2]

Energetické piloty mohou být provedeny v pilotové stěně. Instalovány jsou buď s pravidelným rozstupem mezi jednotlivými pilotami nebo zavrtáváním přes předchozí pilotu, což vytvoří nepropustnou stěnu. [34]

3.6 Podzemní stěny

Podzemní stěny využívané k tepelné výměně s okolním horninovým prostředím fungují na stejném principu jako energetické piloty. Potrubní systém s proudícím teplosměnným médiem je uchycen na ocelovou armaturu podzemní stěny. [34]

3.7 Energetické kotvení

Ve srovnání s uvedenými technologiemi energetických pilotových stěn, podzemních stěn a geotextilií mají kotvy tu výhodu, že jsou zcela obklopeny horninovým prostředím a mohou dosahovat do velkých hloubek, kde jsou schopny pro tepelnou výměnu aktivovat značný objem horninového prostředí. Myšlenka využití kotev jako geotermálního výměníku existuje již dlouhou dobu, problémem však je technická realizace systému geotermálního výměníku do omezeného prostoru kotevního vrtu. [35]

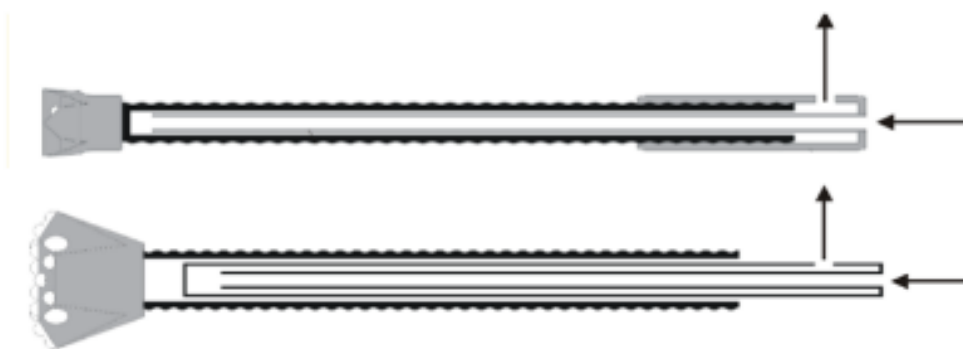
Injektážní kotvy, využívající samozavrtávací kotevní tyče, jejichž dutý vnitřní průměr určený pro výplach a injektování a pramencové kotvy, poskytující dostatek prostoru ve vrtu, mohou být vybaveny systémem geotermálního výměníku. Mechanické kotvy a lepené svorníky tvořené ocelovými tyčemi vyžadují vrty přizpůsobené kotvicími mechanismy (30–50 mm). Tento průměr nemusí splňovat požadavky pro instalaci potrubního systému tepelného výměníku. [36]

Jako prototyp energetické kotvy byl vyvinut kotevní systém s použitím injektážní zavrtávací tyče MAI SDA. Kotevní tyč tohoto systému je konstruována se závitem po vnějším obvodu a volným vnitřním prostorem určeným pro injektáž, který zaručuje dostatek prostoru pro vedení absorpčního média tam i zpět. Po vytvrzení injektážního média vznikne mezi kotvou a horninovým prostředím dokonalý kontakt, uzpůsobený pro tepelnou výměnu. Po instalování kotvy musí být injektážní kanálek vyčištěn od injektážního média. [35]

Pro zavedení tepelného výměníku do kotevního vrtu se dají použít dva způsoby:

- vložení plastové nebo kovové, uzavřené koaxiální sondy do kotevního vrtu,
- využití potrubní z HDPE a jeho vyvedení po vnějším obvodu kotvy. [35]

Tepelně aktivované kotvy byly vyvinuty pro část tunelu Lainzer, v Rakousku. Pro využití kotev se zde využilo koaxiální sondy, viz obrázek 16. Teplosměnný systém je vložen do kotevního vrtu, přívodní potrubí je napojeno na sondu v ose vrtu a odtok se vrací zpět po jeho obvodu. [37]



Obrázek 16: Schéma uložení koaxiální sondy do kotevního vrtu, se znázorněným přítokem teplosměnného média uprostřed vrtu a jeho návratem po obvodu. Převzato z [37]

4 PŘÍKLADY APLIKACÍ, ZKUŠENOSTI

4.1 Tunel Jenbach v Rakousku

Tunel Jenbach je železniční tunel v Rakousku, na severní části napojení na budoucí brennerský báзовý tunel. [38] Výstavba probíhala v letech 2006–2012. Hlavní částí projektu je 3 470 m dlouhý, dvoukolejný železniční tunel. Další částí projektu bylo vybudování sedmi záchranných šachet a štol a jejich napojení na hlavní tunel. Tunel, ražený razícím štítem, má průměr 13 m a jeho příčný průřez je 133 m². Ražba započala v říjnu 2007 a byla dokončena v dubnu 2009. Tunel Jenbach prochází pod stejnojmennou obcí a potencionální odběratel geotermální energie se nacházel v blízkosti záchranné šachty. Stavba prochází zvodnělými písky a šterky a táhne se takřka rovnoběžně vedle řeky Inn. [32] Výška nadloží nad obcí Jenbach činí přibližně 16 m, celkově se pohybuje od 0,5 do 1,6násobku průměru tunelu. Teplota vzduchu v tunelu se pohybuje kolem 12 °C, přičemž neovlivněná teplota horninového prostředí je přibližně 10 °C. [38]

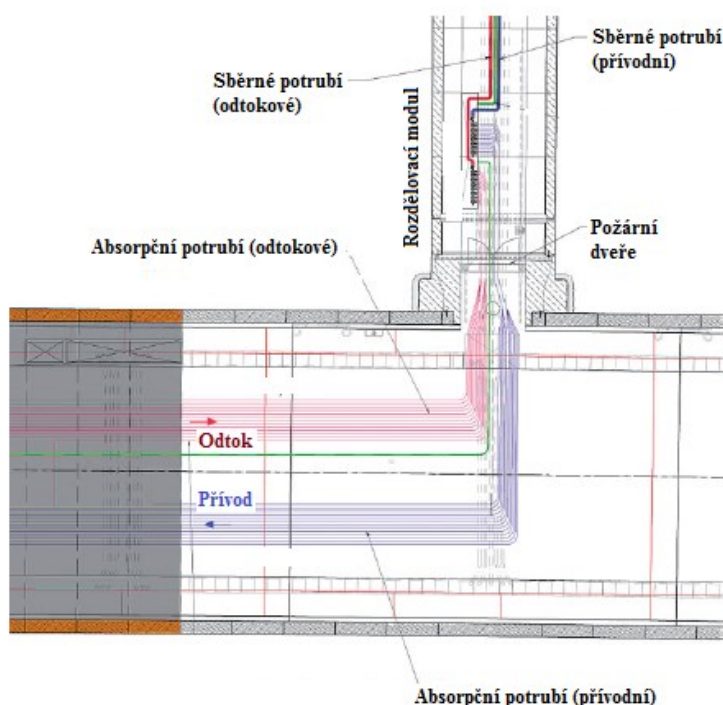
Primární tunelové ostění je tvořeno prefabrikovanými železobetonovými segmenty, o tloušťce 500 mm a sekundární vrstvu tvoří monolitické betonové ostění tloušťky 200 mm, sloužící jako protipožární ochrana. Celkově bylo k pokrytí potřeb poptávky cílového odběratele nainstalováno 27 segmentových prstenců, v délce 54 m. Tepelně aktivovaná plocha činí 2200 m². [38]

Primární okruh tvoří dva až tři tepelně propojené segmentové prstence, které jsou vedeny k rozdělovacímu modulu, viz obrázek 17. Celkem je geotermální systém tvořen třinácti samostatnými okruhy. [38] Sběrné přívodní a odtokové potrubí odtud vede záchrannou šachtou na povrch do obytné čtvrti Jenbachu, kde je připojeno na tepelné čerpadlo. Geotermální systém je navržen k pokrytí běžných požadavků na vytápění. Přibližně 25 m potrubí je umístěno v každém energetickém segmentu. Potrubí je v segmentech uloženo ve smyčkách, s funkcí, jak odbírat, tak ukládat teplo do podloží. Prstenec tvoří sedm segmentů a malý klenák, což v součtu znamená asi 175 m absorpčního potrubí v každém prstenci. Potrubní systém je tvořen překříženým polyethylenem, o vnějším průměru 20 mm. Průměrná rozteč mezi trubkami je 25–30 cm.

Spojování potrubního systému jednotlivých segmentů je provedeno v prefabrikovaných spojkách, takže žádný prvek nevychází. Jelikož je součástí sekundárního

ostění vrstva monolitického betonu, sloužící jako protipožární ochrana, nejsou jak segmenty, tak ani spojovací prvky potrubí dostupné k údržbě. Z tohoto důvodu, je potrubí od každého geotermálního okruhu vedeno k rozdělovači, jež je umístěn za požárními dveřmi záchranné šachty. Takto je možno obsluhovat rozdělovací modul, bez omezení chodu železničního tunelu. Potrubní systém vedoucí od segmentových okruhů je, z důvodu minimálního zbývajících prostoru pro umístění v kabelovodu, veden v počvě tunelu, viz obrázek 18. [38]

Obytná budova, ve kterém je umístěno tepelné čerpadlo, je vzdálena přibližně 90 m od šachty. Délka jak přírodního, tak odtokového potrubí, vedoucího od vstupu do záchranné šachty, do tepelného čerpadla činí přibližně 170 m. [39]



Obrázek 17: Schéma vedení přírodního a odtokového potrubí do rozdělovacího modulu za požárními dveřmi v tunelu Jenbach. Převzato z [32]

Vyžadovaná topná hodnota cílového objektu je přibližně 80 kW, při venkovní teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plynem ovládané tepelné čerpadlo je využito k získání asi 43 kW z geotermálního systému. 28 kW je získáváno procesem spalování v plynem ovládaném tepelném čerpadle. Přibližně 15 kW je zapotřebí odebrat z podloží. Testy provedené v letech 2012 a 2014 ukázaly, že může být dosaženo odběrového výkonu 20–25 kW, což odpovídá hustotě tepelného toku přibližně $12,5\text{ W/m}^2$. [32]



Obrázek 18: Vedení sběrného přívodního a odtokového potrubí k jednotlivým tepelně aktivovaným prstencům. Převzato z [38]

V tunelovém ostění je, z důvodu sledování vlivu odběru tepla na okolní prostředí, nainstalováno osm teplotních senzorů a dva senzory pro měření teploty vzduchu uvnitř tunelu. Vstupní a výstupní teplota média v primárním okruhu je zaznamenávána stejně jako průtok kapaliny v potrubí. Bilancování průtoku spolu s dosaženým teplotním rozdílem kapaliny umožňuje získat údaje o dosaženém tepelném odběru. [26]

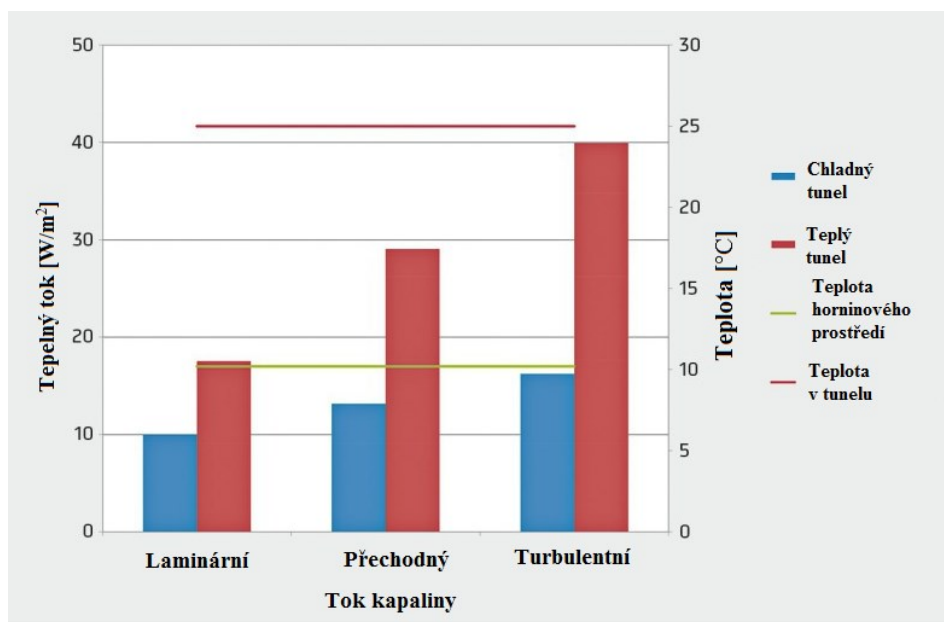
Zvláštní zájem byl věnován problematice toho, jak velké je získatelné množství tepla, za panujících hydrogeologických a konstrukčních podmínek. Z tohoto důvodu byla provedena řada testů, ve kterých byl odběrový výkon navyšován změnami proudění teplosměnného média. Různých hodnot bylo naměřeno při změně toku z laminárního, na přechodný a turbulentní. Bylo vyzorováno, že tepelný tok narůstá výrazně s rostoucím prouděním. Při laminárním typu proudění bylo dosaženo odběrové hodnoty přibližně 10 W/m^2 . S rostoucí rychlostí toku se odběrová hodnota zvýšila na 13 W/m^2 u přechodného proudění a na 16 W/m^2 u turbulentního proudění. [26]

Vyšší odběrová kapacita byla také naměřena teplotními senzory umístěnými v betonových segmentech. Při laminárním proudění teplosměnné kapaliny přesahovala teplota betonu 10 °C . Avšak po změně proudění na turbulentní, s nárůstem odběrové kapacity, se teplota betonu snížila pod 8 °C . [26]

Tepelná kapacita se při změně proudění z laminárního na turbulentní liší až o 60 %. I při relativně vysokých vstupních teplotách, pohybujících se kolem 6 °C, bylo dosahováno extrakčních kapacit větších než 15 W/m². Při nízkých vstupních teplotách teplosměnné kapaliny, vedoucí k většímu rozdílu teploty vzduchu v tunelu a horninového prostředí, se předpokládá vyšší tepelný odběr. [23]

Tunel Jenbach je považován za chladný typ tunelu. Při výpočtech, u kterých bylo počítáno s teoretickou teplotou vzduchu v tunelu 25 °C a teplotou horninového prostředí 10 °C, za konstantní vstupní teploty teplosměnného média 5 °C, bylo dosaženo tepelného odběru mezi 18 a 40 W/m². [26]

Tyto teoreticky vypočítané hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami v tunelu Jenbach. Toto porovnání ukazuje, že odběrové hodnoty jsou při turbulentním proudění teplosměnného média v teplém tunelu až dvakrát vyšší, než je tomu u chladného tunelu. Vzhledem k vyšším teplotám v teplých tunelech, jsou i za laminárního typu proudění teplosměnné kapaliny odběrové hodnoty totožné, jako jsou v chladném tunelu, za turbulentního proudění, viz obrázek 19. Tento fakt má vzhledem k nižším tlakovým ztrátám pozitivní dopad na nároky na čerpadlo a na celkové operační náklady. [26]



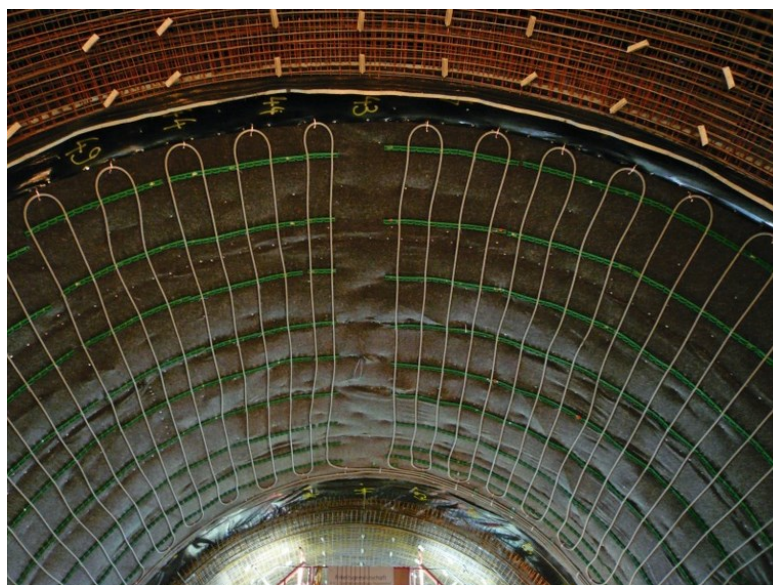
Obrázek 19: Graf porovnávající tepelný odběr v chladném a teplém typu tunelu za laminárního, přechodného a turbulentního typu proudění teplosměnného média v potrubí. Převzato z [26]

4.2 Tunel Stuttgart-Fasanenhof v Německu

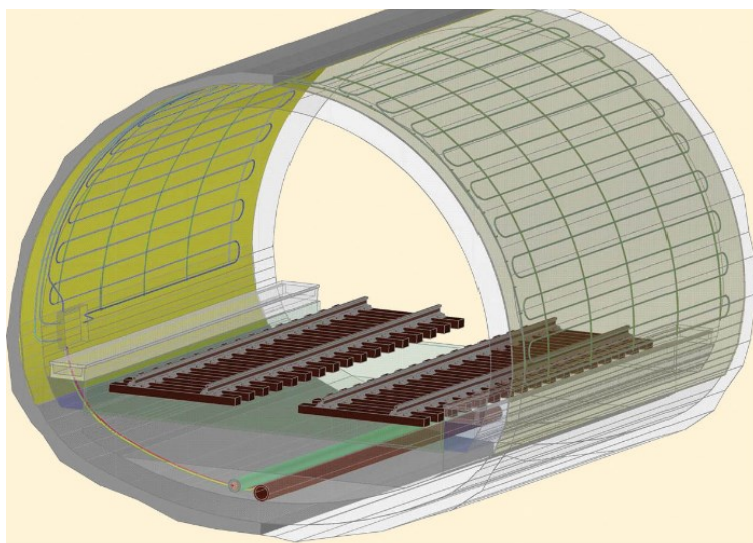
Tunel se nachází ve Stuttgartu, v předměstské části Fasanenhof. Jedná se o dvoukolejný tunel linky stuttgartského metra. Délka ražené části je 380 m, příčný průřez plochy 90 m² má výšku 9,2 m a šířku 7,4 m. Součástí tunelu je také 852 m dlouhá hloubená část. Nejhlouběji uložená část tunelu se nachází 15 m pod povrchem. Ražba probíhala systémem Nové rakouské tunelovací metody, pomocí tunelového impaktoru. Nad relativně nízkým nadložím se nachází výškové budovy a čtyřproudová silnice, stavba byla proto chráněna mikropilotovým deštníkem. [40]

Tunel je situován ve vrstvách vápence, pískovce a jílovce a je umístěn pod hladinou podzemní vody. Geotermální systém zahrnuje dva desetimetrové, tepelně aktivované úseky tunelu, umístěné v kalotě tunelu a rozdělené na dva pod-okruhy, viz obrázek 20. Teplosměnná kapalina je tvořena směsí vody a ethylenglykolu. Potrubní systém je pro snazší montáž připevněn na geotextilii pomocí upevňovacích ližin, v meandrovitém uspořádání. Vrstva geotextilie je připevněna na vnější vrstvu stříkaného betonu a zabudována do vnitřní vrstvy monolitického betonu. Před aplikací sekundárního ostění byla na vnitřní stranu potrubního systému připevněna další vrstva geotextilie, z důvodu ochrany potrubního systému během aplikace sekundární výztuže. Dvě tunelové sekce zabírají plochu přibližně 360 m². [41]

Každá sekce obsahuje 440 m polyethylenových trubek. Absorpční potrubí je tvořeno z vysokohustotního překříženého polyethylenu, o vnějším průměru 25 mm a tloušťce stěny 2,3 mm. [41] Geotermální sekce je řízena pouze jako testovací okruh, bez skutečného odběratele. [39]



Obrázek 20: Uchycení potrubního systému geotermálního výměníku ližinami na primárním ostění tunelu. Převzato z [40]



Obrázek 21: Schéma primárního okruhu geotermálního výměníku a jeho napojení na přívodní a odtokové potrubí v počvě tunelu. Převzato z [42]

Obě geotermální sekce jsou napojeny na hlavní přívodní potrubí, skládající se ze dvou potrubí o vnějším průměru 50 mm, uložených ve vnějším potrubí, průměru 162 mm, viz obrázek 21. Vnitřní prostor mezi potrubími je vyplněn materiálem s nízkou tepelnou vodivostí. Potrubí je umístěno v počvě tunelu, a vede do provozní místnosti, v blízké stanici, ve které je umístěno tepelné čerpadlo, tepelný akumulátor a rozličné ventily. První tunelový úsek je vzdálen 90 metrů od provozní místnosti. Oba tepelně aktivované úseky jsou od sebe vzdáleny 80 metrů. Tepelné čerpadlo v provozní místnosti může být použito

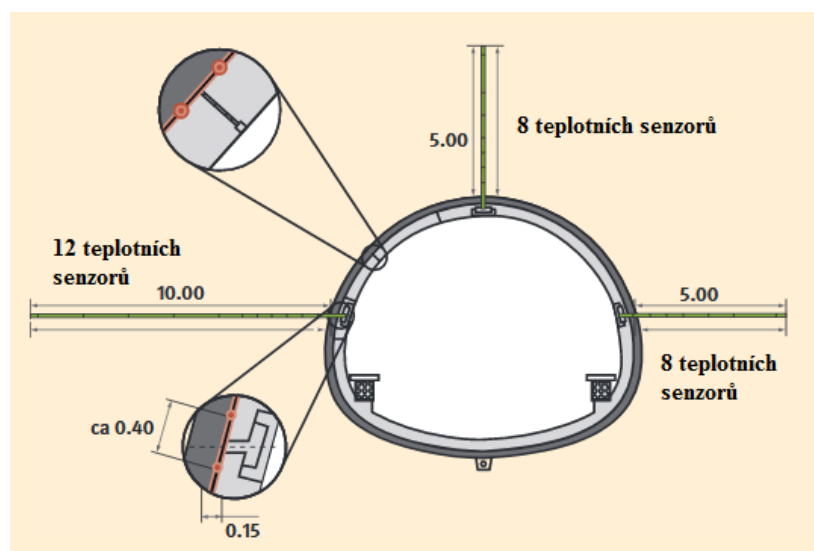
k navýšení extrakční teploty tepelného odběru. Zpětný chod tepelného čerpadla může být použit pro chladicí účely. [41]

Tunelové úseky jsou vybaveny řadou různých teplotních snímačů, zaznamenávajících teplotu vzduchu v tunelu, teplotu ostění a okolního horninového prostředí. V každé z obou tepelně aktivovaných sekcí, jsou umístěny čtyři měřicí body, zaznamenávající teplotu ostění. Tři měřicí sondy byly instalovány v obou úsecích, k měření teploty uvnitř horninového prostředí, viz obrázek 22. Sondy jsou 5–10 metrů dlouhé, zaznamenávající každé 2 minuty teploty ve vymezených úrovních. K měření teplot jsou použity sondy PT–100, s přesností na 0,1 °C. Teplota cirkulujícího média je zaznamenávána uvnitř potrubního systému, při vstupu a výstupu z absorpčního systému. Průtok média v primárním okruhu je kontrolován oběhovým čerpadlem a zaznamenáván při vstupu média do okruhu. [41]

Hlavním zájmem průzkumu bylo zjistit objem geotermálního systému a jeho vliv na teplotu okolního horninového prostředí. Dalším zájmem bylo zjistit, jaký má vzduch uvnitř tunelu vliv na množství odebrané tepelné energie. První měření se stálými vstupními teplotami v tepelném výměníku, v chladicím režimu, ukázaly rozsah mezi 5 W/m² a 37 W/m², na jeden tepelně aktivovaný úsek. Nejvyšší výkon byl dosažen na začátku chladicí fáze. Tepelný výkon se snižoval s časem, v důsledku zvyšování teploty okolí tepelného absorbéru. Numerické analýzy prokázaly, že pro dlouhodobý chladicí či topný režim může být dosaženo abstrakčních hodnot mezi 3 W/m² a 8 W/m², v závislosti na ročním období. Ukázalo se také, že na tepelném výstupu má vliv i vzduch uvnitř tunelu. [40]

Teplota v blízkém okolí tunelu se změnila v důsledku konstrukce tunelu. Měření ukázalo, že teplota podloží je ovlivněna pouze do vzdálenosti přibližně 8 m okolo tunelu. Ve vzdálenostech delších než 8 m nebyly zaznamenány změny teplot. Neovlivněná teplota horninového masivu v okolí tunelu se pohybuje kolem 12 °C. Teplota vzduchu v tunelu se mění v závislosti na počasí. Tento aspekt také ovlivňuje teplotu horninového prostředí do vzdálenosti 8 metrů od tunelu. V těchto oblastech se teplota pohybuje mezi 2 °C a 18 °C. [42]

Geotermální systém je řízen teplotou a objemovým průtokem teplosměnného média. Dodávaná teplota se řídí nařízeními Kanceláře ochrany životního prostředí Stuttgartu. Vzhledem k těmto nařízením, nesmí teplota podzemní vody dosáhnout hodnoty 0 °C, v topném režimu. V chladicím režimu nesmí teplota podzemní vody překročit hranici 25 °C. [42]



Obrázek 22: Schéma sond měřících teplotu uvnitř horninového masivu a teplotu v betonovém ostění. Převzato z [42]

4.3 Vídeňské metro: Sekce U2

Zabudování geotermálního tepelného výměníku do čtyř stanic vídeňského metra bylo proveden během prodloužení sekce linky U2. Do té doby byly prostory stanic metra aktivně vytápěny a ochlazovány za pomoci elektricky poháněného klimatizačního systému. Použití plynu bylo z bezpečnostních důvodů vyloučeno. [8]

Stanice byly konstruovány metodou ražby pod zastropením. Absorpční systém je uložen v podzemních stěnách, základových deskách a pilotech. Čtyři stanice metra linky U2 jsou využívány jako geotermální stanice. Topný potenciál všech čtyř stanic metra dohromady činí přibližně 827 kW a chladicí potenciál je přibližně 509 kW. Dosažené odběrové hodnoty stanic jsou uvedeny v grafu 2. Princip uložení potrubního systému primárního geotermálního okruhu ve všech čtyřech stanicích je následující: [43]

- Stanice U2/1 – Schottenring: Potrubní systém využitý pro tepelnou výměnu je umístěn ve 1450 m² základových desek a 1120 m² pilotových stěn.

- Stanice U2/2 – Taborstraße: Absorpční potrubí je uloženo v podzemních stěnách, zaujímající plochu 2300 m², v zavrtávaných pilotách, o ploše 281 m² a v základových deskách plochy 1720 m².
- Stanice U2/3 – Praterstern: Teplosměnné potrubí je uloženo v podzemních stěnách, které zabírají celkovou plochu 7400 m² a v základových deskách o ploše 3740 m².
- Stanice U2/4 – Messe: Potrubní systém tepelného výměníku je umístěn v základových deskách, které zabírají plochu 2350 m². Jelikož je energetický požadavek stanice relativně malý, je aktivována pouze část základové desky. [43]

Stanice	U2/1 - Schottenring	U2/2 - Taborstraße	U2/3 - Praterstern	U2/4 - Messe
Topná kapacita (kW)	105	185	455	82
Roční topná energie (MWh/rok)	170	175	411	110
Chladicí kapacita (kW)	65	114	280	50
Roční chladicí energie (MWh/rok)	143	525	469	324

Tabulka 2: Dosažené odběrové hodnoty stanic vídeňského metra. Upraveno z [34]

Konstrukce primárního okruhu geotermálního výměníku do nosných konstrukčních prvků probíhala ve všech stanicích obdobně. Výztužné ocelové klece byly v předstihu vybaveny potrubními smyčkami, z důvodů omezených prostor k manipulaci na staveništi. [43]

Piloty a podzemní stěny byly prováděny z povrchu. Výztužné klece byly kvůli velkým hloubkám konstruovány po částech. Z tohoto důvodu byly jednotlivé trubky vybaveny spojovacími dílci. Jednotlivé výztužné klece byly svařovány dohromady před zavedením do podloží. Tlakové testy potrubí byly prováděny během kontroly výztužných klecí a po jejich zabetonování. Po zavedení podzemních stěn či pilot na úroveň základové desky, byla provedena roznášecí vrstva betonu. Poté byly otevřeny spojovací body potrubního systému a připraveny na propojení. Z připojovacích bodů pilot a stěn byly absorpční trubky vyvedeny na roznášecí vrstvu betonu, pod budoucí základovou desku. [43]

Potrubí muselo být chráněno především proti poškození během betonáže a zabezpečeno proti tlakovým napětím po zabetonování základové desky. Proto bylo obaleno pěnou, která byla spojena s injekčními trubičkami na horní straně základové desky. Tento

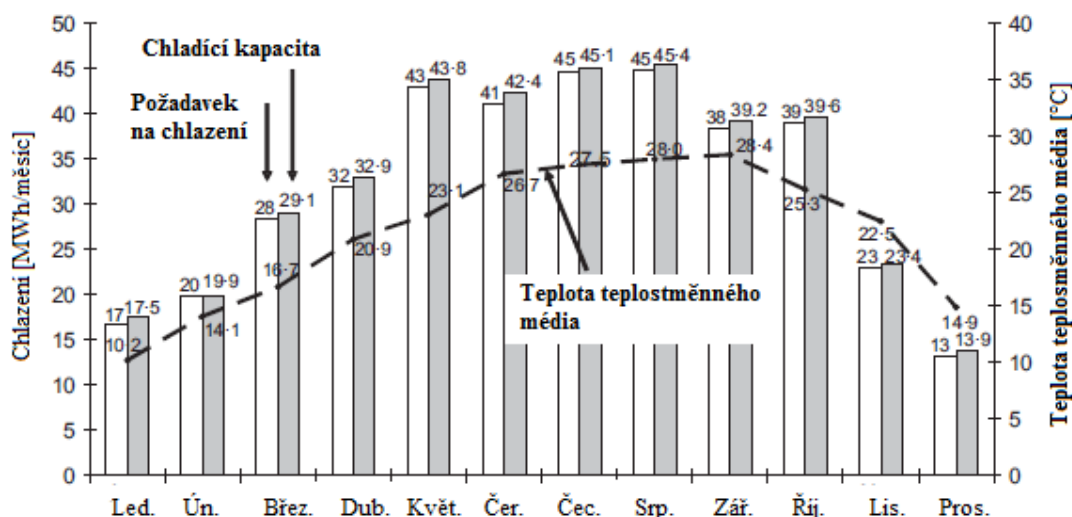
volný prostor vytvořený pěnou byl zabetonován a po vytvrdnutí betonu injektován elastickou pryskyřicí. V místech s velkou koncentrací tlakových napětí byl tento proces prováděn ve dvou fázích. [43]

Tunel u stanice U2/2 Taborstraße byl taktéž vybaven geotermálním systémem. Potrubní systém byl uložen do protiklenby, mezi primární a sekundární ostění. [43]

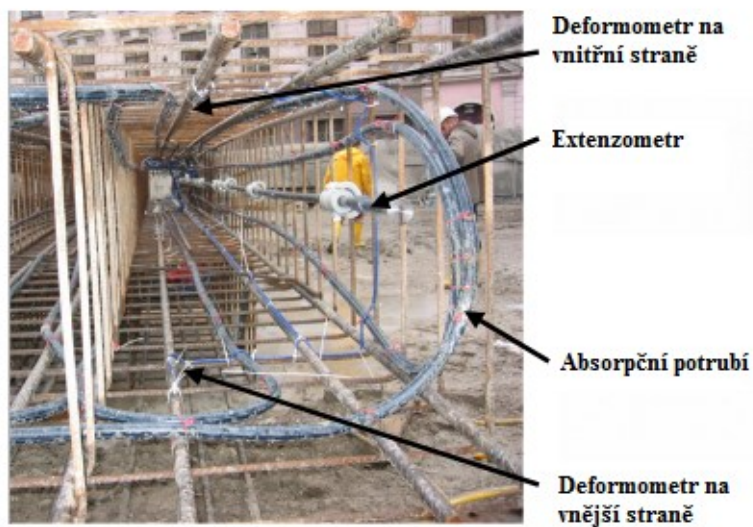
K monitorování teplot byly na podzemní stěny, pod základové desky a do tunelových tubusů zavedeny různé teplotní senzory. Navíc byly ve stanici U2/2 naistalovány přídatná měřidla, pro zjišťování vlivu tepelných změn na napětí v betonových konstrukcích, viz obrázek 24. Zaznamenávána byla také úroveň přetvoření podzemní stěny. Slouží pro monitorování a zajištění kvality systému, podobně jako tomu je u observační metody, dále také pro potřeby údržby a optimalizací geotermálního systému. [8]

Čtyři teplotní měřidla byla naistalována z důvodu měření vstupní a výstupní teploty teplosměnné kapaliny v potrubním systému. Extenzometry, s možností kotvení v sedmi úrovních, využité k měření posunů pod základovou deskou, za podzemními zdmi a uvnitř podzemních zdí. Dvacet jedna tenzometrů bylo instalováno k měření rozpínání, smršťování a teplot na vnitřní a vnější straně a uprostřed podzemní stěny. [8]

Geotermální systém je schopen plně soběstačně, po celý rok klimatizovat prostory stanice U2/2 Taborstraße, viz obrázek 22. [8]



Obrázek 23: Graf porovnávající kapacitu geotermálního systému s nároky na klimatizování, ve stanici Taborstraße. Upraveno z [8]



Obrázek 24: Osazení podzemní stěny měřicími zařízeními.
Převzato z [43]

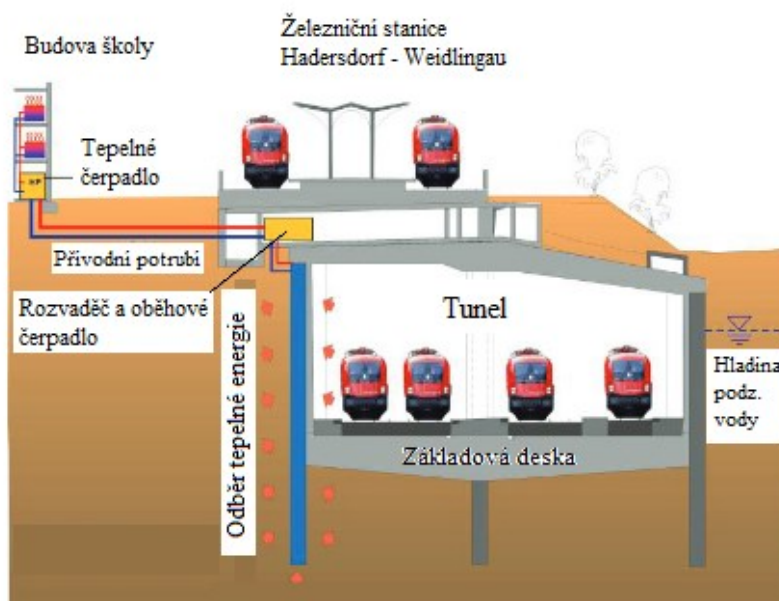
4.4 Tunel Lainzer ve Vídni

Železnice, procházející severními oblastmi Vídně byla vyprojektována k posílení dopravy mezi Vídní a západní Evropou. Otevřena byla v roce 2012 a její hlavní částí je 12,8 km dlouhý tunel, jehož úseky slouží také jako geotermální výměníky. Část tunelu byla budována metodou ražby pod zastropením, sestávající z široko průměrových zavrtávaných pilot, železobetonové základové desky a klenby. Část tunelu byla ražena Novou rakouskou tunelovací metodou, s primárním ostěním ze stříkaného betonu vyztuženého ocelovou výztuží, svorníků a kotev a sekundárního ostění z monolitického betonu. Pro optimalizaci energetického návrhu a pro výzkumné účely, byly vyprojektovány následující geotermální projekty:

- Sekce LT24, Hadersdorf-Weidlingau: Součást sekce budované metodou ražby pod zastropením.
- Sekce LT22, Bierhäuslberg: Umístěna je v sekci ražené Novou rakouskou tunelovací metodou. Během konstrukce byla vynalezena nová technologie tepelné aktivace betonového ostění. Poprvé bylo absorpční potrubí připevňováno na geotextilie, které byly poté instalovány mezi primární a sekundární ostění tunelu. [44]

V sekci LT24, která byla budována metodou ražením pod zastropením je ostění tunelu tvořeno zavrtávanými pilotami, z nichž každá třetí je využita jako energetická pilota. Tepelně využitá část sestává z 59 zavrtávaných pilot, o průměru 1,2 metru a průměrné délky 17,1 metru. Prostor mezi pilotami je vyplněn a utěsněn tryskovou injektáží. Energetické piloty jsou vybaveny potrubním systémem, připojeným k přívodnímu a odtokovému potrubí. Sběrná potrubí vedou do rozvaděče, který je snadno přístupný na vrcholu hloubeného tunelu. Manometry umožňují detailní kontrolu vodotěsnosti celého potrubního systému. Přívodní potrubí, o průměru 150 mm spojuje rozvaděč s tepelnými čerpadly v nedaleké škole, z důvodu jejího vytápění, viz obrázek 25. [8]

Geotermální systém je schopen v ročního tepelného odběru až 214 MWh. Výhody geotermálního výměníku vedou ve vytápěné škole k ročním úsporám až 10 000 euro, v porovnání s topným systémem využívajícím zemního plynu. Roční spotřeba plynu klesla o 34 000 m³, což vedlo ke snížení tvorby oxidu uhličitého o 30 tun. [8]



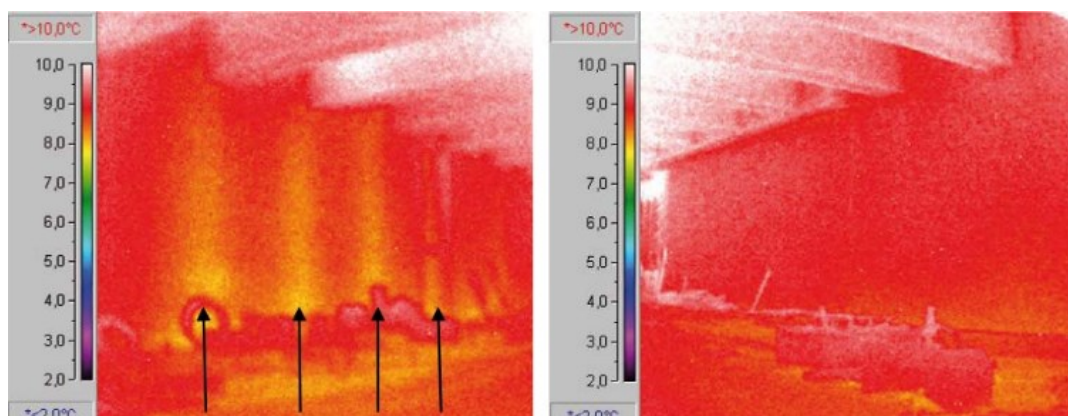
Obrázek 25: Schéma sekce LT24 tunelu Lainzer, geotermální okruh se skládá z pilotové stěny a potrubního systému, který spojuje piloty s oběhovým čerpadlem v rozvaděči a rozvaděč s tepelnými čerpadly v budově školy. Upraveno z [8]

Geotermální systém byl konstruován jako demonstrativní projekt, v kontextu s výzkumnou činností rakouské vlády. Vzhledem k tomuto vědeckému zájmu byly piloty hustě osazeny měřicími sondami. Šest energetických pilot bylo vybaveno 18 teplotními sondami v různých úrovních, navíc jedna pilota byla vybavena tenzometry, měřícími jak napětí v pilotě, tak i teploty. Měřicí zařízení zaznamenávají efekt topných a chladících fází

na změny teploty a únosnosti pilot. Dále je také zaznamenávána teplota a průtok teplosměnného média, hodnota odebraného tepla a teploty v rozvodech sběrných potrubí. [8]

První testovací období energetické stanice začalo v únoru 2004. Přibližně 40 MWh topné energie bylo možno odebrat prostřednictvím pilotové stěny během prvních měsíců chodu. Od podzimu 2004 poskytoval energetický systém topnou energii blízké škole. Během druhého topného období, v zimě 2004/2005 bylo odebráno celkově 186 MWh tepla a v zimě 2005/2006 to bylo 193 MWh. Toto množství geotermální energie se shoduje s předpovídanou maximální hodnotou pro topné období. [44] Jako kritérium pro topný režim školy je brána v úvahu venkovní teplota vzduchu. Do $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ může být škola vytápěna pouze prostřednictvím odebírání podzemní energie. Při nižších teplotách je potřeba zapojit plynový kotel. [8]

Z měření průběhu teplot a napětí v pilotách vyplynulo, že deformace vyvolané teplotou jsou výrazně nižší, než napětí vyvozená tlakem zeminy a přirozený výkyv teplot uvnitř tunelu má větší vliv, než změny teplot vyvozené v důsledku odebírání/ukládání tepla v energetických pilotách. Procesy geotermálního výměníku dokonce vytváří jednotnější průběh teplot v pilotách, tedy menší teplotní rozdíly mezi hlavou a patou a mezi vnitřní a vnější stranou piloty. Toto teplotní bilancování omezuje teplotou vyvozené momenty uvnitř piloty. Provoz geotermálního systému přirozeně způsobuje výraznější ohřívání a ochlazování pilot, viz obrázek 26. Vyvozené objemové změny však nezpůsobují přídavná zatížení konstrukce. [44]



Obrázek 26: Porovnání chladnějších tepelně aktivované pilotové stěny s pilotou stěnou bez tepelného výměníku. Převzato z [8]

ZÁVĚR

Světové zásoby fosilních paliv, v porovnání s teplem, jež je možno získat z podloží, rychle mizí. Využití geotermální energie představuje jen špičku ledovce mezi obnovitelnými zdroji. Instalace primárního okruhu tepelného výměníku do ostění tunelů však představuje inovativní způsob čerpání energie z tohoto obnovitelného zdroje. Návrh takového systému je velmi složitou činností, jejíž efektivitu ovlivňuje tepelná vodivost okolního horninového prostředí, teplota vzduchu uvnitř tunelu a tok podzemní vody v okolním horninovém masivu.

Úvodní část bakalářské práce, s názvem „Princip geotermálních tepelných výměníků“, byla zaměřena na vysvětlení teoretických poznatků o proudění geotermální energie z nitra Země k jejímu povrchu a vymezení základních vlastností podloží a podzemní vody, jejichž znalost je nezbytná pro správný návrh tepelného výměníku. Byly zde popsány jednotlivé typy geotermálních tepelných výměníků, přecherpávajících teplo z mělkých vrstev pod povrchem a okrajové podmínky pro jejich návrh. V neposlední řadě také princip dimenzování geotermálních výměníků a základní popis chodu tepelného čerpadla, spolu s hodnocením jeho účinnosti. V závěru první kapitoly byly vyčteny pozitiva a výhody využití těchto tepelných výměníků oproti konvenčním způsobům vytápění.

V kapitole „Geotermální výměníky v tunelových ostěních, princip instalace“ bylo uvedeno rozdělení tunelů, podle způsobu odebírání tepla, prostřednictvím jejich kontaktu s horninovým prostředím. Byly zde vymezeny jednotlivé možnosti instalace systému geotermálních tepelných výměníků do tunelových ostění. Zmíněné skutečnosti potvrzují fakt, že je možná značná prefabrikace potrubních systémů tepelných výměníků, ať už jde o jejich kotvení na geotextilie či na ocelovou výztuž. Díky tomuto poznatku aktivace ostění pro čerpání geotermální energie výrazněji nezpomaluje ani neprodražuje výstavbu.

Závěrečná kapitola, s názvem „Příklady aplikací, zkušenosti“, obsahuje konkrétní příklady využívání tunelových ostění, pro získávání geotermální energie. Na jednotlivých příkladech zde byl popsán způsob konstrukce tunelu, aktivace tunelového ostění pro geotermální požadavky, instrumentace pro spravování chodu tepelného výměníku a dosažené hodnoty tepelného odběru. Z této kapitoly vyplývá, že množství odebraného tepla pro vytápění, či uloženého tepla pro klimatizování veřejných prostor, je při vhodných podmínkách aplikace dostatečné, ať už k soběstačnému chodu nebo v kombinaci s jiným konvenčním způsobem vytápění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] B. FRIDLEIFSSON, Ingvar, Ruggero BERTANI, John W. LUND a Ladislaus RYBACH. *The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change* [online]. Luebeck, Německo: IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, 2008 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20100308014920/http://www.iea-gia.org/documents/FridleifssonetalIPCCGeothermalpaper2008FinalRybach20May08_000.pdf
- [2] *Ground Energy: Technical Information* [online]. GeoCore s.r.o, 2012 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.geocore.cz/wp-content/uploads/2017/11/Ground-Energy-GEO.pdf>
- [3] VIESSMANN, spol. s r.o. *Teplo z přírody* [online]. 2011 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/7173-teplo-z-prirody>
- [4] DŘÍMAL, Petr. *Tepelné čerpadlo a geotermální energie* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://moodle.sspbrno.cz/pluginfile.php/7467/mod_resource/content/1/Pro%C4%8Ditele%20%20Tepeln%C3%A9%20%C4%8Derpadlo%20a%20geoterm%C3%A1ln%C3%AD%20energie.pdf
- [5] MARKIEWICZ, Roman, Andreas OBERHAUSER a Dieter ADAM. Nachhaltige Nutzung von Erdwärme mittels innovativer Systeme im Ingenieurtiefbau und Tunnelbau. *Bautechnik und Naturgefahren* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.baunat.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/departement/kongress_mai07/beitraege/Nachhaltige_Nutzung_von_Erdwrme_mittels_innovativer_Systeme_im_Ingenieurtiefbau_und_Tunnelbau.pdf
- [6] BUDKOVSKÝ, Jan. *Geotermální výměníky – přidaná hodnota základových prvků*. [online]. 2016 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/tzb/geotermalni-vymeniky-pridana-hodnota-zakladovych-prvku_43890.html
- [7] BOUAZZA, A. a D. ADAM. *Turning geostructures into sources of renewable energy* [online]. ANZ 2012 Conference Proceedings, 2012 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_210904.pdf
- [8] BRANDL, Heinz. Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds. *Procedia Engineering*. 2016, **165**, 747-764. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.773. ISSN 18777058. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816341340>
- [9] LALOUI, Lyessse a Alice DI DONA. *Energy geostructures: innovation in underground engineering*. London: ISTE Ltd/John Wiley and Sons, 2013. ISBN 978-1-848-21572-6.

- [10] *Thermal Response Test* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.teplozezeme.cz/nabidka-trt/>
- [11] HÁJOVSKÝ, Radovan. Thermal Response Test (TRT) – systém pro měření teplotní odezvy horninového masivu. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2012 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9616.pdf
- [12] SANNER, Burkhard, Göran HELLSTRÖM, Jeff SPITLER a Signhild GEHLIN. *Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application* [online]. Proceedings World Geothermal Congress 2005, 2005 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.702.2864&rep=rep1&type=pdf>
- [13] ZERVANTONAKIS, I. a M. REUSS. *Quality Requirements Of a Thermal Response Test* [online]. ZAE-Bayern (Bavarian Center for Applied Energy Research), 2006 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/10A-2.pdf
- [14] HAJOVSKY, R., P. VOJCINAK, M. PIES a J. KOZIOREK. Thermal Response Test (TRT) – System for Measurement of Thermal Response of Rock Massif. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013, 46(28), 126-131. DOI: 10.3182/20130925-3-CZ-3023.00087. ISSN 14746670.
- [15] *Tepelná čerpadla země-voda: úsporné vytápění energií Země* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-alternativni/tepelna-cerpadla/zeme-voda.php>
- [16] *Kruhový děj* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/609-kruhovy-dej>
- [17] BRANDL, Heinz. Thermo-active Ground-Source Structures for Heating and Cooling. *Procedia Engineering*. 2013, 57, 9-18. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.005. ISSN 18777058.
- [18] MATUŠKA, Tomáš. *Parametry pro hodnocení efektivity soustav s tepelnými čerpadly: SPF a PER* [online]. 2015 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13272-parametry-pro-hodnoceni-efektivita-soustav-s-tepelny-mi-cerpadly-spf-a-per>
- [19] BRANDL, H. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*. 2006, 56(2), 81-122. DOI: 10.1680/geot.2006.56.2.81. ISSN 0016-8505.
- [20] MCCARTNEY, John S. *Engineering performance of energy foundations* [online]. Pan-Ams CGS Geotechnical Conference, 2011 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper1205.pdf>

- [21] BARLA, Marco, Alice DI DONNA a Andrea PERINO. Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*. 2016, **61**, 104-113. DOI: 10.1016/j.geothermics.2016.01.014. ISSN 03756505.
- [22] TINTI, Francesco, Daniela BOLDINI, Marco FERRARI, et al. Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel – BBT. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, **70**, 182-203. DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.011. ISSN 08867798.
- [23] MOORMANN, Christian, Patrik BUHMANN, Wolf FRIEDEMANN, Sebastian HOMUTH a Norbert PRALLE. Tunnel geothermics-International experience with renewable energy concepts in tunnelling. *Geomechanics and Tunnelling*. 2016, **9**(5), 467-480. DOI: 10.1002/geot.201600048. ISSN 18657362.
- [24] *Underground Thermal Energy Storage: Renewable Source of Heating and Cooling* [online]. Rehau: Unlimited polymer solution [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: https://www.icax.co.uk/pdf/REHAU_UTES_ICAX.pdf
- [25] NICHOLSON, Duncan. *Geothermal Tunnel Linings Principles of Geothermal Tunnel Linings* [online]. 2012 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.gshp.org.uk/pdf/Duncan_Nicholson_Tunnelling.pdf
- [26] *Geothermal Segments: The Tunnel as Heat Supplier* [online]. 2016 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Geothermal_Segments_The_Tunnel_as_Heat_Supplier_2568184.html
- [27] BARTÁK, Jiří. *PODZEMNÍ STAVBY* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2009/05/provadeni-pz_celek_1_25.pdf
- [28] *NRTM –Nová rakouská tunelovací metoda* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20B%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20NRTM.pdf>
- [29] *Ražená a hloubená díla* [online]. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/nase-technologie/razena-a-hloubena-dila>
- [30] MAŘÍK, Libor. Ražba tunelů pod zastropením – metoda želva. *Stavebnictví*. 2017.
- [31] TINTI, Francesco, Daniela BOLDINI, Marco FERRARI, et al. Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel – BBT. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, **70**, 182-203. DOI: 10.1016/j.tust.2017.07.011. ISSN 08867798.

- [32] FRODL, Stephan, Jan Niklas FRANZIUS a Thomas BARTL. Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach. *Geomechanics and Tunnelling*. 2010, **3**(5), 658-668. DOI: 10.1002/geot.201000037. ISSN 18657362. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/geot.201000037>
- [33] RIECHERS, J. *Harvesting wastewater energy - turning segmental lined interceptor sewers into heat exchangers* [online]. Washington, DC, Spojené státy americké: Proceedings of the EWA/JSWA/WEF Water and Energy, 2015 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://www.herrenknecht-formwork.com/fileadmin/user_upload/herrenknecht-formwork.com/Seiteninhalte/Medien/Ver%C3%B6ffentlichungen/Water_and_Energy_2015_Paper_Joerg_Riechers_Turning_segmental_lined_interceptor_sewers_into_heat_exchangers.pdf
- [34] GONÇALVES, Rui António da Costa. *Thermal and Thermal-Mechanical Analysis of Thermo Active Shallow Tunnel Section* [online]. 2014 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090412989/Thesis.pdf>
- [35] KÜRTEN, Sylvia. *Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen*. 2014. Disertační práce. Rýnsko-Vestfálská technická vysoká škola Aachen. Vedoucí práce Martin Ziegler, Dietmar Adam.
- [36] MIMOUNI, Thomas, Fabrice DUPRAY a Lyesse LALOUI. Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-and-cover tunnel. *Geothermics*. 2014, **51**, 380-387. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.02.007. ISSN 03756505.
- [37] MIMOUNI, Thomas, Fabrice DUPRAY, Sophie MINON a Lyesse LALOUI. *Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels* [online]. Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS), 2013 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://infoscience.epfl.ch/record/190673/files/21453_1417_Inhalt.pdf
- [38] Mařík Libor, 2012: Zajímavá technická řešení výstavby tunelů na příkladech ze zahraniční praxe. *Beton TKS* [online]. 2012 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-6-46_0.pdf
- [39] BUHMANN, P., B. WESTRICH, C. MOORMANN, A. BIDARMAGHZ a G. NARSILIO. An investigation of the potential thermal energy of geothermal tunnels with focus on a case study in Stuttgart, Germany. *Energy Geotechnics*. CRC Press, 2016, 2016-08-09, 601-605. DOI: 10.1201/b21938-94. ISBN 978-1-138-03299-6.
- [40] BERG, Anders, Manuel GRIMM a Konstantinos STERGIAROPOULOS. *Geothermal usage in inner city tunnels-A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany* [online]. 12 IEA Heat Pump Conference, 2017 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://hpc2017.org/wp->

content/uploads/2017/05/P.2.7.4-Geothermal-Usage-in-Inner-City-Tunnels-A-Study-of-the-Fasanenhof-Subway-Tunnel-in-Stuttgart-Germany.pdf

[41] BUHMANN, Patrik, Christian MOORMANN, Bernhard WESTRICH, Norbert PRALLE a Wolf FRIEDEMANN. Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2016, **8**, 1-7. DOI: 10.1016/j.gete.2016.10.006. ISSN 23523808.

[42] GEIMER, Christina. *Metro Tunnels enable geothermal air-conditioning* [online]. 2013 [cit. 2018-04-25]. ISSN 0937-8367. Dostupné z: http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2013/PM_09_2013/ProjektInfo_0913_engl_internetx.pdf

[43] MARKIEWICZ, R. a D. ADAM. *Extraction of geothermal energy from tunnels* [online]. Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2005 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/22/STAL9781614996569-1629.pdf>

[44] BRANDL, Heinz: Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*. 2006, (56), 81–122. ISSN 0016-8505.

[45] NICHOLSON, D., Q. CHEN, A. PILLAI a M. CHENDORAIN. Developments in thermal pile and thermal tunnel linings for city scale gshp systems [online]. 2013 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Nicholson.pdf>

[46] TAŠEK, Martin. Místní ztráta ve spoji plastového potrubí svařovaného na tupo. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Jan Melichar.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Graf závislosti teploty horninového prostředí na hloubce pod povrchem a ročním období. Upraveno z [24]	10
Obrázek 2: Schéma horizontálně uloženého, uzavřeného geotermálního tepelného výměníku. Převzato z [2]	11
Obrázek 3: Schéma uložení vertikálního, uzavřeného geotermálního tepelného výměníku. Převzato z [2]	11
Obrázek 4: Tepelný tok v zemině suché, částečně saturované a saturované. Upraveno z [9]	16
Obrázek 5: Schéma aparatury pro TRT. Upraveno z [12]	17
Obrázek 6: Schéma tepelného čerpadla. Převzato z [15]	20
Obrázek 7: Uložení potrubního systému tepelného výměníku na armaturu piloty. Převzato z [8]	22
Obrázek 8: Uložení potrubního systému tepelného výměníku na armaturu podzemní stěny. Převzato z [35]	23
Obrázek 9: Uložení potrubního systému geotermálního tepelného výměníku na geotextilii mezi primární a sekundární ostění. Převzato z [22]	28
Obrázek 10: Uložení potrubního systému geotermálního tepelného výměníku do protiklenby tunelu. Převzato z [5]	28
Obrázek 11: Schéma uložení potrubního systému geotermálního tepelného výměníku na primární betonové ostění nebo geotextilii. Upraveno z [22]	29
Obrázek 12: Spojovací kapsa prefabrikovaného segmentu. Převzato z [26]	30
Obrázek 13: Uchycení potrubního systému tepelného výměníku na výztužnou klec prefabrikovaného segmentu. Převzato z [45]	30
Obrázek 14 : Napojení přívodního a odtokového potrubí na potrubní systém v prefabrikovaném segmentu. Převzato z [45]	31
Obrázek 15: Schéma okruhů tepelně propojených segmentových prstenců a přítokového a odtokového potrubí s možností zpětného toku. Převzato z [45]	32
Obrázek 16: Schéma uložení koaxiální sondy do kotevního vrtu, se znázorněným přítokem teplosměnného média uprostřed vrtu a jeho návratem po obvodu. Převzato z [37]	34
Obrázek 17: Schéma vedení přívodního a odtokového potrubí do rozdělovacího modulu za požárními dveřmi v tunelu Jenbach. Převzato z [32]	36

Obrázek 18: Vedení sběrného přívodního a odtokového potrubí k jednotlivým tepelně aktivovaným prstencům. Převzato z [38]	37
Obrázek 19: Graf porovnávající tepelný odběr v chladném a teplém typu tunelu za laminárního, přechodného a turbulentního typu proudění teplosměnného média v potrubí. Převzato z [26]	38
Obrázek 20: Uchycení potrubního systému geotermálního výměníku ližinami na primárním ostění tunelu. Převzato z [40]	40
Obrázek 21: Schéma primárního okruhu geotermálního výměníku a jeho napojení na přívodní a odtokové potrubí v počvě tunelu. Převzato z [42]	40
Obrázek 22: Schéma sond měřících teplotu uvnitř horninového masivu a teplotu v betonovém ostění. Převzato z [42]	42
Obrázek 23: Graf porovnávající kapacitu geotermálního systému s nároky na klimatizování, ve stanici Taborstraße. Upraveno z [8]	44
Obrázek 24: Osazení podzemní stěny měřícími zařízeními. Převzato z [43]	45
Obrázek 25: Schéma sekce LT24 tunelu Lainzer, geotermální okruh se skládá z pilotové stěny a potrubního systému, který spojuje piloty s oběhovým čerpadlem v rozvaděči a rozvaděč s tepelnými čerpadly v budově školy. Upraveno z [8]	46
Obrázek 26: Porovnání chladnějších tepelně aktivované pilotové stěny s pilotou stěnou bez tepelného výměníku. Převzato z [8]	47

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Orientační hodnoty tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a hustoty vybraných hornin a materiálů. Upraveno z [2]	14
Tabulka 2: Dosažené odběrové hodnoty stanic vídeňského metra. Upraveno z [34]	43